

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

**BIOFILTRO EDIFICIO DE TAMICES DE LA E.D.A.R DE ARAZURI:
ESTUDIO Y PROPUESTA DE MEJORAS.**

presentado por

ÁNGEL ARANA DE PABLO *(e)k*

aurkeztua

INGENIERO AGRONOMO
NEKAZARITZA INGENIARITZA

Septiembre, 2.010 / 2.010, *Iraila.*

BIOFILTRO EDIFICIO DE TAMICES DE LA E.D.A.R DE ARAZURI: ESTUDIO Y PROPUESTA DE MEJORAS.

Presentado por: ÁNGEL ARANA DE PABLO.

Tutor: NATXO IRIGOIEN IRIARTE.

Septiembre, 2.010 / 2.010, *Iraila*.

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRONOMOS
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO

RESUMEN.

Existen en la actualidad diversas instalaciones industriales, que aunque tienen como finalidad la mejora de la calidad medioambiental, durante su funcionamiento provocan una serie de molestias a las poblaciones de su entorno.

Estas industrias son de distintos tipos: estaciones depuradoras de aguas residuales, fábricas de compost, plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos...siendo las emisiones causantes de malos olores el mayor perjuicio causado.

Ante esta situación, se hace cada vez más necesario el control y tratamiento de dichas emisiones mediante la adopción de medidas minimizadoras de las mismas y métodos de tratamiento.

Este es el caso de la Estación Depuradora de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona situada en Arazuri, donde en la actualidad se están adoptando las medidas necesarias para la minimización y tratamiento de las emisiones susceptibles de provocar molestias por malos olores en su entorno.

Se están llevando a cabo las obras necesarias para la conversión del sistema actual de compostaje, (sistema de pilas abiertas al aire libre), a un sistema de compostaje de pilas abiertas confinadas en una nave. De esta forma la corriente olorosa generada durante este proceso podrá ser capturada para ser sometida a un proceso de tratamiento que minimice los olores generados una vez sea la corriente emitida a la atmósfera.

Ante los múltiples métodos de tratamiento para la reducción de sustancias causantes de malos olores existentes, en la planta de Arazuri se ha seleccionado un sistema de tratamiento considerado como biológico. Tras la captación de la corriente de gas de la futura nave de compostaje, ésta será tratada mediante biofiltración.

Previamente a la puesta en marcha de la nave de compostaje, se ha llevado a cabo la instalación de un biofiltro de menor tamaño para el tratamiento de la corriente de aire proveniente de otro de los puntos susceptibles de causar malos olores, como es el edificio de tamices y los espesadores de la planta. Además de método de tratamiento de la corriente proveniente del edificio de tamices, este biofiltro cumple la función de servir como ensayo para la optimización del funcionamiento de los biofiltros de la nueva nave de compostaje.

Los objetivos que trata de alcanzar el presente trabajo son los de realizar un seguimiento del biofiltro de tamices que permita la posterior descripción de la instalación y de todos los parámetros que influyen en su funcionamiento. Tras lo cual, se presentan una serie de propuestas de modificaciones en su manejo para intentar alcanzar el nivel de eficiencia potencial de la instalación.

La metodología empleada para la elaboración del trabajo se ha basado en la recogida de los valores alcanzados por diversos parámetros, su análisis y su comparación con los valores considerados como ideales en el funcionamiento de sistemas de biofiltración.

Aunque en la actualidad, no existe una legislación específica que regule el nivel de emisión de sustancias olorosas derivadas de las actividades industriales, sí hay ya redactado algún borrador (Cataluña es la Comunidad Autónoma más adelantada en este aspecto), y parece claro que ha de ser la biofiltración el sistema de eliminación de olores empleado en muchos tipos de industrias por su gran eficacia y bajo coste de operatividad.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco la colaboración y disponibilidad de los componentes del Departamento de Medio Ambiente e I + D de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Arazuri: Sandra Blázquez; Beatriz Yaben; Aritz Etxarri. Así como a Imelda Urtasun perteneciente al Departamento de Control de Calidad.

Al tutor del trabajo, Natxo Irigoien por el ofrecimiento y la ayuda y a Iván Jáuregui por toda la ayuda prestada durante el desarrollo del ensayo.

ÍNDICE GENERAL.

1.- INTRODUCCIÓN.	<i>pág. 1</i>
<hr/>	
2.- ANTECEDENTES.	<i>pág. 3</i>
<hr/>	
2.1.- Importancia del control de olores. Caso particular de la E.D.A.R Arazuri.	<i>pág.3</i>
2.2.- Sistemas alternativos para el control de olores.	<i>pág.6</i>
2.2.1. - Sistemas de control físico-químico.	<i>pág. 8</i>
2.2.1.1.- Incineración u oxidación: oxidación térmica y oxidación catalítica.	<i>pág. 8</i>
2.2.1.2.- Absorción.	<i>pág. 10</i>
2.2.1.3.- Adsorción.	<i>pág. 13</i>
2.2.1.4.- Condensación.	<i>pág. 15</i>
2.2.2.- Sistemas de control biológicos.	<i>pág. 17</i>
2.2.2.1.- Biofiltros convencionales o de lecho fijo.	<i>pág. 20</i>
2.2.2.2.- Biofiltro percolador o de lecho escurrido.	<i>pág. 23</i>
2.2.2.3.- Biolavadores o bioscrubber.	<i>pág. 24</i>
2.2.3.- Pautas para la selección de un sistema de control de corrientes odoríferas.	<i>pág.</i>
25	
2.3.- Biofiltros convencionales.	<i>pág. 27</i>
2.3.1- Antecedentes de la biofiltración.	<i>pág. 27</i>
2.3.2.- Biofiltros convencionales: fundamentos.	<i>pág. 29</i>
2.3.2.1.- Selección del medio filtrante o material de relleno.	<i>pág. 29</i>
2.3.2.2.- Efectos del pH.	<i>pág. 31</i>
2.3.2.3.- Pérdida de presión del gas tratado.	<i>pág. 33</i>
2.3.2.4.- Contenido en humedad del biofiltro.	<i>pág. 34</i>
2.3.2.5.- Temperatura del medio filtrante.	<i>pág. 35</i>
2.3.2.6.- Microorganismos y biopelícula.	<i>pág. 35</i>
2.3.2.7.- Características del gas portador.	<i>pág. 38</i>
2.3.3.- Aplicaciones de la biofiltración.	<i>pág. 39</i>

3.- OBJETIVOS.	pág. 41
----------------	---------

4.- MATERIAL Y MÉTODOS.	pág. 42
-------------------------	---------

4.1.- Descripción del biofiltro de ensayo de Arazuri.	pág. 42
---	---------

4.2.- Dimensionamiento del biofiltro.	pág. 42
---------------------------------------	---------

4.3.- Determinación del régimen de funcionamiento inicial.	pág. 44
--	---------

4.3.1.- Temperatura del material de relleno.

pág. 44

4.3.2.- Humedad del material de relleno.	pág. 45
--	---------

4.3.3.- pH del material de relleno.	pág. 46
-------------------------------------	---------

4.3.4.- Altura del material de relleno.	pág. 47
---	---------

4.3.5.- Caracterización del gas tratado.	pág. 48
--	---------

4.3.5.1.- Temperatura y humedad.	pág. 48
----------------------------------	---------

4.3.5.2.- Detección de sustancias inhibidoras de la actividad del biofiltro.	pág. 50
--	---------

4.3.6.- Caracterización del lixiviado del biofiltro.	pág. 51
--	---------

4.3.7.- Evaluación de la eficiencia del biofiltro en la eliminación de olores.	pág. 53
--	---------

4.4.- Propuesta de modificaciones en el funcionamiento del biofiltro.	pág. 54
---	---------

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	pág. 55
-----------------------------	---------

5.1.- Descripción del biofiltro de ensayo de Arazuri.	pág. 55
---	---------

5.1.1.- Ubicación del biofiltro en el proceso de depuración

de la E.D.A.R. de Arazuri.	pág. 55
----------------------------	---------

5.1.2.- Esquema general de la instalación.	pág. 57
--	---------

5.1.3.- Descripción de instalaciones.	pág. 60
---------------------------------------	---------

5.1.3.1.- Características de la obra civil.	pág. 60
---	---------

5.1.3.2.- Sistema de extracción.	pág. 63
----------------------------------	---------

5.1.3.3.- Descripción del sistema de riego.	pág. 65
---	---------

5.1.3.4.- Material de relleno empleado.	pág. 66
---	---------

5.1.3.5.- Manejo del biofiltro.	pág. 68
---------------------------------	---------

5.2.- Dimensionamiento del biofiltro.	pág. 69
---------------------------------------	---------

5.3.- Determinación del régimen de funcionamiento.	<i>pág. 71</i>
5.3.1.- Temperatura del material de relleno.	
<i>pág. 71</i>	
5.3.2.- Humedad del material de relleno.	<i>pág. 75</i>
5.3.3.- pH del material de relleno.	<i>pág. 79</i>
5.3.4.- Altura del material de relleno.	<i>pág. 79</i>
5.3.5.- Caracterización del gas tratado.	<i>pág. 81</i>
5.3.5.1.- Temperatura y humedad.	<i>pág. 81</i>
5.3.5.2.- Detección de sustancias inhibidoras de la actividad del biofiltro.	<i>pág. 82</i>
5.3.6.- Caracterización del lixiviado del biofiltro.	<i>pág. 85</i>
5.3.7.- Evaluación de la eficiencia del biofiltro en la eliminación de olores.	<i>pág. 87</i>
5.4.- Propuesta de modificaciones en el funcionamiento del biofiltro.	<i>pág. 88</i>
 6.- CONCLUSIONES.	 <i>pág. 105</i>
<hr/>	
7.- BIBLIOGRAFÍA.	<i>pág. 107</i>
<hr/>	
ANEXOS.	<i>pág. 111</i>
<hr/>	

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura nº 1. Diagrama de funcionamiento de los sistemas de oxidación térmica.
_____ pág. 9.

Figura nº 2. Esquema de una instalación de oxidación catalítica. _____ pág.
9.

Figura nº 3. Equipos de tratamiento de gases por absorción. _____ pág. 11

Figura nº 4. Esquema de funcionamiento de un filtro de carbón activo. _____ pág.
14.

Figura nº 5. Esquema de un equipo de condensación para depuración de gases.
_____ pág. 16.

Figura nº6. Mecanismo de degradación del contaminante en sistemas biológicos.
_____ pág. 18.

Figura nº7. Esquema general de funcionamiento de un biofiltro de lecho fijo. _____ pág.
20.

Figura nº 8. Esquema de un filtro biológico percolador para el control de la contaminación del
aire. _____
pág. 23.

Figura nº 9. Esquema de funcionamiento de un biolavador para tratamiento de gases
contaminados.
_____ pág. 24.

Figura nº 10. Clasificación de las distintas tecnologías para la depuración de gases.
_____ pág. 25.

Figura nº 11. Esquema del procesamiento de lodos llevado a cabo en Arazuri.
_____ pág 56.

Figura nº 12. Representación esquemática de la instalación del biofiltro de tamices.
_____ pág. 58.

Figura nº 13. Representación de la planta del biofiltro de tamices. _____ pág 61.

Figura nº 14. Representación del perfil del biofiltro. _____ pág 62.

Figura nº15. Representación de las conducciones de lixiviados del biofiltro hasta la arqueta.
_____ pág. 98.

Fotografía nº1. Ejemplo de Scrubber de la casa comercial *Sistemas y Tecnologías Ambientales*.
_____ pág. 12.

Fotografía nº 2. Biofiltro de 5 lechos superpuestos de material filtrante inorgánico para el tratamiento de los olores de una granja avícola. _____ pág. 21.

Fotografía nº 3. Ejemplo de biofiltro construido con módulos plásticos para el tratamiento de caudales de aire bajos. _____ pág. 22.

Fotografía nº 4 y nº 5. Sonda para medición de temperaturas *Testo175* - *T2* y lanza de acero.
_____ pág. 44.

Fotografía nº 6. Sonda de humedad modelo *ML 2X*. _____ pág. 45.

Fotografía nº 7. Data logger modelo *DL 6*, para registro de datos. _____ pág. 45.

Fotografía nº 8 y nº 9. Momento de la recogida de las muestras número 1 y número 2. ____ pág. 46.

Fotografía nº 10 y nº 11. Momento de la recogida de la muestra número 3 y modo en el que fueron recogidas las muestras número 4 y número 5. _____ pág. 47.

Fotografía nº 12. Forma en la que fue colocada la bomba de humo frío y fotografía de detalle de la misma. _____ pág. 48.

Fotografía nº 13. Termo higrómetro modelo *HI 96340* utilizado. _____ pág.48.

Fotografía nº 14. Campana empleada para las mediciones y representación esquemática de la misma con sus dimensiones. _____ pág. 49

Fotografía nº 15. Arqueta en la que se realizaron las mediciones y momento de la medición.
_____ pág.49.

Fotografías nº 16 y nº 17. Punto y momento de la medición a la salida del relleno de la temperatura y humedad del gas tratado.
_____pág.49.

Fotografía nº 18 y nº 19. Bomba de fuelle de la casa *Dräger* modelo *Accuro* y tubos colorimétricos *Dräger*. _____pág. 50.

Fotografía nº 20 y nº 21. Momento de la medición de la concentración de gases en la salida del biofiltro utilizando la campana y medición a la entrada del biofiltro en la arqueta de la sala de tamices. _____pág. 51.

Fotografía nº 22 y nº23. Situación de la arqueta de recogida de muestras en el biofiltro y momento de la toma de una de las muestras. _____pág. 51.

Fotografía nº 24. Vista frontal del biofiltro. En primer término la rampa de acceso, al fondo el edificio de tamices. _____pág. 58

Fotografía nº 25. Vista de la parte trasera del edificio de tamices con los espesadores nº 1 y nº 2.
_____pág. 59.

Fotografía nº 26. Vista general del biofiltro. _____pág. 60.

Fotografía nº 27. Interior de la cámara de humidificación y detalle de las losas perforadas que son colocadas sobre la tabicas para la formación del plenum. _____pág. 62.

Fotografía nº 28. Conducción del aire desde los espesadores hasta edificio de tamices (140 mm) y conducción del aire en la planta baja del edificio (250 mm). _____pág. 63.

Fotografía nº 29: Conducción de la primera planta del edificio de tamices, habitáculo de insonorización del ventilador y conducción tras el ventilador. Ventilador instalado para la succión.
_____pág. 64.

Fotografía nº 30. Conducción desde el edificio de tamices hasta el biofiltro, llegada sobre la parte superior de la cámara de humidificación. Desembocadura en la cámara de humidificación y aberturas de acceso al plenum. _____pág. 64.

Fotografía nº 31. Distribución de la tubería de polietileno en la superficie del biofiltro, detalle de uno de los aspersores. Cámara de humidificación con duchas. Electroválvulas de control de ambos circuitos. _____ pág. 65.

Fotografía nº 32. Primera capa de material filtrante compuesta por madera de chopo y fotografía de detalle de dicho material. _____ pág. 66.

Fotografía nº 33. Final del proceso de cribado donde es obtenido el material de rechazo y detalle de la superficie del material de relleno del biofiltro. _____ pág. 67.

Fotografía nº 34. Perfil del material filtrante del biofiltro de tamices. _____ pág. 67.

Fotografía nº 35. Momento de la realización de la prueba de inyección de humo frío en el material de relleno. _____ pág. 80.

Fotografía nº 36. Corrosión aparecida en la cubierta metálica del biofiltro. _____ pág. 83.

Fotografía nº 37. Estado inicial de las losas perforadas que forman el plenum. Estado en el que se encontraban al ser vaciado el biofiltro. _____ pág. 89.

Fotografía nº 38. Ejemplo de biofiltro de la empresa Weidner Ibérica. _____ pág. 89.

Fotografía nº 39. Puertas de acceso al edificio de tamizado de la planta depuradora y ejemplo de trampilla de aspiración. _____ pág. 90.

Fotografía nº 40. Puntos de la sala de tamices sin campana localizada. Arriba, campanas instaladas en las tamizadoras. Ejemplo de campana localizada de una tolva. _____ pág. 91.

Fotografía nº 41. Ejemplo de fallo en el sistema de riego del biofiltro. _____ pág. 92.

Fotografía nº 42. Solución adoptada en la depuradora de Manresa para el pretratamiento del aire. _____ pág. 94.

Fotografía nº 43. Punto 1 propuesto tras el paso de la corriente por el ventilador, donde existe la posibilidad de la instalación de un manómetro. _____ pág. 94.

Fotografía nº 44. Ubicación propuesta para el punto 2, previamente a la entrada de la corriente en la cámara de humidificación. _____ pág. 95.

Fotografía nº 45. Ubicación del punto 4. Similar al punto de toma actual. _____ pág. 96.

Fotografía nº 46. Traviesas instaladas en el biofiltro de tamices. _____ pág. 96.

Fotografía nº 47. Estado de las vigas que sustentan la cubierta metálica del biofiltro. _____ pág. 97.

Fotografía nº 48. Vista del perfil del biofiltro. Ejemplo de partículas de tamaño superior al cribado realizado. _____ pág. 99.

Fotografía nº 49. Vista de una porción de la superficie del biofiltro de tamices con una amplia presencia de vegetación. _____ pág. 104.

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Características de los principales compuestos responsables de la aparición de olores en estaciones depuradoras. _____ pág. 3.

Tabla nº 2. Clasificación de los biofiltros en función de cómo se encuentren la fase líquida y biológica. _____ pág. 18.

Tabla nº 3. Tabla resumen de las ventajas y desventajas de los equipos de tratamiento de tipo biológico para la eliminación de gases contaminantes y olorosos. _____ pág. 26.

Tabla nº 4. Resumen de las características de distintos materiales empleados como medio filtrante en biofiltros convencionales. _____ pág. 31.

Tabla nº 5. Microorganismos presentes en medios de relleno de biofiltros. _____ pág. 36.

Tabla nº 6. Número de muestras y profundidades a las que fueron recogidas para la elaboración del perfil de pH del material de relleno del biofiltro. _____ pág. 46.

Tabla nº 7. Propiedades del aire en función de su temperatura. _____ pág. 52.

Tabla nº 8. Resultados medios obtenidos en las mediciones de temperatura efectuadas. __ *pág. 71.*

Tabla nº 9. Media de los valores obtenidos por la sonda de temperatura de tipo continuo. _ *pág. 72.*

Tabla nº 10. Datos medios de los valores obtenidos por las sondas de humedad instaladas.
_____ *pág. 75.*

Tabla nº 11. Resultados obtenidos en el análisis de pH del perfil del material de relleno.
_____ *pág. 79.*

Tabla nº 12. Temperatura y humedad del gas tratado a la entrada y a la salida del biofiltro.
_____ *pág. 81.*

Tabla nº 13. Muestreo de presencia de sustancias inhibidoras de la actividad del biofiltro.
_____ *pág. 82*

Tabla nº 14. Cantidad de ácido sulfhídrico y amoníaco eliminados en el lixiviado del biofiltro.
_____ *pág. 85.*

Tabla nº 15. Tabla resumen con los valores de los parámetros de funcionamiento de biofiltros.
_____ *pág.101.*

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica nº 1. Temperaturas en continuo (superficie y 0,75 cm.), para frecuencia de riego diaria.
_____ pág. 73.

Gráfica nº 2. Temperaturas en continuo (superficie y 0,75 cm.), para frecuencia de riego 2.
_____ pág. 73.

Gráfica nº 3. Valores de humedad en las sondas instaladas para frecuencia de riego 1. ____ pág.
76

Gráfica nº 4. Valores de humedad en las sondas instaladas para frecuencia de riego 2. ____ pág. 76.

Gráfica nº 5: valores de humedad medios para frecuencia de riego 1. _____ pág.
77.

Gráfica nº 6. Valores de humedad medios para frecuencia de riego 2. _____ pág. 77.

Gráfica nº 7. Representación de las curvas de caudales para las dos frecuencias de riego. _ pág. 85.

ÍNDICE DE ANEXOS.

1. VISTA AÉREA DE LA E.D.A.R. DE ARAZURI. _____ pág. 112.
2. ESQUEMA GENERAL BIOFILTRO DE TAMICES. _____ pág. 114.
3. ESQUEMA GENERAL DEL TRATAMIENTO REALIZADO EN LA E.D.A.R. DE ARAZURI _____ pág. 116.
4. MÉTODO DE CÁLCULO DE DOSIS DE RIEGO EN SUPERFICIE PARA EL BIOFILTRO. _____ pág. 118.
5. TABLA DE EFECTOS GENERADOS POR LA PRESENCIA DE H₂S A DISTINTAS CONCENTRACIONES. _____ pág. 120.
6. NORMATIVA: “Olfatometría dinámica UNE – EN 13.725”. _____ pág. 123.

1.- INTRODUCCIÓN.

Para el control y tratamiento de emisiones contaminantes y malolientes de origen industrial existen distintas alternativas posibles. Hasta ahora, los procedimientos más habituales se basaban en las propiedades físico químicas del contaminante emitido. Dentro de este grupo se encuentran distintos métodos de tratamiento como son la oxidación térmica y catalítica, incineración, absorción y adsorción.

Como alternativa a los tratamientos de tipo convencional surgieron los tratamientos de tipo biológico, basados en la utilización de microorganismos para la oxidación de los componentes contaminantes de las emisiones a otro tipo de compuestos menos contaminantes.

El menor coste de instalación y puesta en marcha de este tipo de dispositivos biológicos, así como la gran eficacia durante su funcionamiento, hace que sea una tecnología cada vez más demandada para el control de las emisiones causantes de olores.

Para el caso particular de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Arazuri, se ha optado por la instalación de tres grandes biofiltros que traten el aire proveniente del nuevo edificio de compostaje de biosólidos que va a ser construido en la planta depuradora.

Previamente a la puesta en marcha de los biofiltros definitivos, en la Estación Depuradora de Arazuri se instaló un biofiltro de menor tamaño que permitiese, mediante su estudio, determinar los parámetros de funcionamiento óptimos de los biofiltros finales. Este biofiltro procesa el aire proveniente del edificio de tamices y los espesadores de la planta.

La finalidad de la elaboración de este Trabajo Final de Carrera no es otra más que el de llegar a conocer de manera lo más exacta posible el funcionamiento del biofiltro instalado en la sala de tamices. Optimizando los parámetros de funcionamiento que hagan que una vez puestos en marcha los biofiltros para el tratamiento de la corriente

generada en la nueva nave de compostaje, éstos alcancen los niveles de efectividad más altos posibles.

Varios han sido los condicionantes que han influido en el desarrollo del trabajo. En primer lugar la poca información que se dispone hoy en día sobre el sistema de biofiltración para la eliminación de sustancias causantes de malos olores, ya que aunque hay reseñas bibliográficas que aluden a la instalación de biofiltros en los primeros años de la década de los veinte, no es hasta los años 70 y 80 cuando esta tecnología comienza a desarrollarse con más interés. Por tanto, es una tecnología relativamente nueva de la que hasta ahora no se han publicado grandes estudios.

En segundo lugar, el Trabajo Final de Carrera comenzó a desarrollarse cuando el biofiltro de tamices ya había sido construido y estaba en funcionamiento, con lo que no fue posible la variación de alguno de sus parámetros iniciales o alguna de sus características que hubiesen facilitado el desarrollo del ensayo.

Por otro lado, al ser el biofiltro propiedad de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, (M.C.P), no se trata de una instalación experimental si no que es un biofiltro en activo para el tratamiento de los efluentes gaseosos de una parte de las instalaciones de la E.D.A.R. de Arazuri; el acceso a la información y las variaciones en el funcionamiento de la instalación ha sido costoso y ha influido de manera directa en la duración que ha tenido el estudio.

2.- ANTECEDENTES.

2.1.- Importancia del control de olores. Caso particular de la E.D.A.R Arazuri.

Las emisiones de gases generadas en los procesos industriales son, hoy en día, una de las principales causas del deterioro ambiental además de ser generadoras de malos olores que afectan a la calidad del aire.

Estas emisiones, en combinación con ciertas condiciones topográficas y meteorológicas que agravan su impacto, generan un efecto negativo muy importante sobre el medio ambiente y el bienestar de las localidades cercanas a los centros de emisión.

Los contaminantes del aire que se encuentran presentes en estas emisiones, se clasifican de varias maneras. Dependiendo de su composición química, de acuerdo a su modo de generación o de acuerdo a su estado físico. (*Organización Mundial de la Salud, 2000.*)

En estaciones depuradoras de aguas residuales, atendiendo a la composición química del contaminante, una clasificación de los compuestos emitidos podría ser la presentada en la siguiente tabla:

Tabla 1. Características de los principales compuestos responsables de la aparición de olores en estaciones depuradoras. (*Modificado de Batlle et al, 1996.*)

Clase compuesto	Compuesto químico	Fórmula química	Carácter del olor	Umbral olfativo mg/Nm ³ aire
Sulfurados	Acido sulfhídrico	SH ₂	Huevo podrido	0.0001 a 0.03
	Metilmercaptano	CH ₃ SH	Ajo	0.0005 a 0.08
	Etilmercaptano	C ₂ H ₅ SH	Verdura desc.	0.0001 a 0.03
	Dimetilsulfuro	(CH ₃) ₂ S	Legumbre desc.	0.0025 a 0.65
	Dietilsulfuro	(C ₂ H ₅) ₂ S	Eter	0.0045 a 0.31
	Dimetildisulfuro	(CH ₃) ₂ S ₂	Pútrido	0.003 a 0.014
Nitrogenados	Amoniaco	NH ₃	Picante e irritante	0.5 a 37
	Metilamina	CH ₃ NH ₂	Pescado desc.	0.021
	Etilamina	C ₂ H ₅ NH ₂	Picante amoniacal	0.05 a 0.83
	Dimetilamina	(CH ₃) ₂ NH	Intenso pescado	0.047 a 0.16
	Comp. cíclicos	C ₆ H ₇ NH	Fecal	0.0006
	Nitrogenados	C ₉ H ₉ NH	Fecal	0.0008 a 0.10
Acidos Grasos	Cadaverina	NH ₂ (CH ₂) ₅ NH ₂	Carne descomp.	—
	Ac. acético	CH ₃ COOH	Vinagre	0.025 a 6.5
	Ac. butírico	C ₃ H ₇ COOH	Mantequilla desc.	0.0004 a 3
Aldehidos y Cetonas	Ac. valérico	C ₄ H ₉ COOH	Sudor	0.008 a 1.3
	Formaldehido	HCHO	Agrio, sofocante	0.033 a 12
	Acetaldehido	CH ₃ CHO	Manzanas	0.04 a 1.8
	Butiraldehido	C ₃ H ₇ CHO	Rancio	0.013 a 15
	Isovaleraldehido	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CHO	Manzanas	0.072
	Acetona	CH ₃ COCH ₃	Fruta dulce	1.1 a 240

La planta depuradora que trata el agua de la Cuenca de Pamplona es uno de los centros de emisión de olores de la zona. Los olores son causados durante el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Comarca de Pamplona, tratadas en la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Arazuri y por el proceso de compostaje de lodos realizado en la misma planta.

Aunque la base de funcionamiento de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) consiste en la protección del medio ambiente frente a la contaminación generada por los vertidos acuosos urbanos e industriales, a causa del contenido de materia orgánica del agua residual y a su descomposición producida tanto en la red de alcantarillado que transporta el agua, como en los centros de almacenamiento de la materia orgánica dentro de la planta depuradora, ésta emite al ambiente sustancias que son causantes de malos olores y que pueden considerarse como contaminantes atmosféricos. Estas emisiones pueden resultar molestas tanto para el personal que desempeña su trabajo en el interior de la planta, como para los habitantes cercanos a ella. (Coll et al. 2006).

A la Estación Depuradora de Arazuri llegan, a través de una red de colectores, las aguas residuales de la Comarca de Pamplona para ser sometidas a un proceso de depuración que permita devolverlas al río Arga en las mejores condiciones.

En la actualidad, una red de colectores, de más de 900 Km de extensión, recoge y canaliza hasta la Estación Depuradora de Arazuri el 99% de las aguas residuales que se generan en la Comarca de Pamplona. El total de población atendida en esta estación es de más 270.000 habitantes recibiendo un caudal de agua a tratar de 1.200 - 1.300 l/s.

Uno de los subproductos generados en el proceso de depuración del agua residual son los biosólidos provenientes de los decantadores. Cada año son generadas 30.000 toneladas de biosólidos durante el proceso de depuración del agua que pueden ser empleados directamente en campo como enmienda orgánica, o tras un proceso de compostaje, en horticultura y jardinería. (*M. C. P.es, 2.010.*).

Para la obtención de dicho compost, en la Estación Depuradora de Arazuri, se sigue un proceso que consta de varias fases. En la primera de ellas, los biosólidos son mezclados con restos de poda y corteza de pino, tras lo cual, la mezcla es dispuesta en pilas de compostaje para su fermentación al aire libre. Tras un periodo de tiempo no inferior a tres meses, el resultado obtenido de la fermentación pasa a ser cribado obteniéndose así un compost que puede ser utilizado para realizar labores de siembra, plantación, recebado de áreas verdes, etc.

La producción de malos olores durante el proceso de compostaje depende en gran medida del tipo de residuo a compostar, así los residuos sólidos urbanos y los lodos de las depuradoras de aguas residuales son los que producen peores olores. La actual promoción y el incipiente desarrollo que tiene el compostaje han venido acompañados, desafortunadamente, por un creciente rechazo de la población a tener plantas de compostaje y, en general, de tratamiento de residuos, en las proximidades de viviendas particulares. (*Moreno et al, 2008.*)

Este impacto en la población hace que se demande, por parte de la misma, de cambios en los procesos de fabricación y la adopción de sistemas de control y eliminación de olores para minimizar el impacto generado.

En la planta de Arazuri se prevé realizar varias modificaciones e inversiones en este aspecto. Se modificará el sistema actual de compostaje pasando de un sistema de

compostaje de pilas abiertas al aire libre a un sistema de compostaje de pilas abiertas confinadas en una nave. Mediante este cambio se pasará de un sistema de compostaje donde no puede darse un tratamiento de las corrientes de aire generadas a un proceso en el que las corrientes puedan ser tratadas, evitándose así, la generación de perjuicio al medio ambiente y a las poblaciones cercanas a la planta. El aire contaminado de la nueva nave de compostaje será conducido mediante un sistema de extracción a un sistema de depuración compuesto de tres biofiltros donde, tras su tratamiento, podrá ser emitido a la atmósfera sin carga contaminante ni odorífera. Las obras necesarias se encuentran actualmente en fase de construcción.

2.2.- Sistemas alternativos para el control de olores.

Son varios los sistemas existentes hoy en día para el tratamiento de los gases procedentes de los procesos de compostaje y en general, para todos los procesos industriales generadores de malos olores.

Todos estos métodos se agrupan en dos grandes grupos: por un lado, sistemas de control de olores basados en las propiedades físico - químicas de los gases y en segundo lugar sistemas de tratamiento de tipo biológico.

Hasta la actualidad, la mayoría de instalaciones construidas para el control de emisiones olorosas estaban basadas en tecnologías pertenecientes al primero de los grupos al haber sido las más desarrolladas. Todos estos sistemas de control presentan altos niveles de eficiencia en la eliminación de olores, pero no en la eliminación de las sustancias causantes de esos olores. Ya que su funcionamiento se basa en la transferencia del contaminante desde una fase a otra, generando una segunda corriente que igualmente ha de ser tratada.

Esta característica, junto con el alto coste de instalación y mantenimiento de los equipos además del alto requerimiento energético de los mismos, hacen que las tecnologías pertenecientes a los sistemas de tratamiento convencionales sean tecnologías con costes muy elevados.

Frente a las técnicas convencionales surgieron las técnicas de tipo biológico que se presentan, hoy en día, como una alternativa muy fiable. El principio en el que se basan estas técnicas es en el empleo de microorganismos de tipo aerobio para la degradación de las sustancias responsables de los malos olores. Frente a los métodos convencionales, las técnicas biológicas no sólo hacen que desaparezcan los olores, si no, que degradan las sustancias que los provocan.

Para el caso de los procesos de compostaje, se hace necesario tener en cuenta las características específicas que poseen dichos procesos a la hora de la elección del método de desodorización.

Estas características son:

- El caudal a tratar es, generalmente, muy elevado.
- La concentración de contaminantes suele ser baja.
- La temperatura suele estar ligeramente por encima de la ambiental.
- La presión es similar a la atmosférica.
- El nivel de humedad es elevado.
- El nivel de olor es elevado.

Estos factores condicionan en gran medida la selección de los sistemas de tratamiento de gases aplicables a la mayoría de procesos de compostaje. (*Moreno et al, 2008.*)

En los siguientes puntos del trabajo se describen y analizan las distintas tecnologías existentes en la actualidad para el tratamiento de olores.

2.2.1. - Sistemas de control físico-químico.

2.2.1.1.- Incineración u oxidación: oxidación térmica y oxidación catalítica.

Método basado en la reactividad del contaminante con oxígeno a distintas condiciones de temperatura y presión. La incineración es un proceso en el cual el gas que contiene el contaminante es capturado por un sistema industrial de ventilación, precalentado, mezclado y oxidado a altas temperaturas dando como resultado compuestos oxidados menos olorosos que los productos de partida.

En los Sistemas de Oxidación se produce la depuración de emisiones contaminadas en base al calentamiento de los gases a tratar, normalmente hasta unos 750 - 850°C e incluso hasta 950°C, durante 0,5-1s, de manera que los compuestos orgánicos se oxidan drásticamente, obteniéndose niveles de eficiencia muy elevados (99,9%, en algunos casos).

La capacidad de tratamiento de estos sistemas varía desde pocos centenares de m³/h hasta más de 100.000 m³/h.

Este método de eliminación de malos olores es aplicable en el caso de compostaje de biosólidos de depuradora, pero presenta los siguientes inconvenientes que hacen que no sea una tecnología muy utilizada en este caso:

- Las corrientes de gas oloroso a tratar han de contener sustancias oxidables a una concentración menor que su límite explosivo.
- Si las corrientes tratadas contienen azufre, (como es el caso de las E.D.A.R.), se pueden formar corrientes salientes de SO₂ (dióxido de azufre), que aunque es menos oloroso, es altamente corrosivo y contaminante. Por la misma razón, pueden formarse también óxidos de nitrógeno.
- En ocasiones, el propio carburante empleado en la combustión puede contener impurezas que al quemarse pueden generar problemas.
- La oxidación presenta un alto requerimiento de combustible que encarece el proceso, haciendo que esta tecnología sea empleada únicamente para el tratamiento de corrientes de aire que sean difíciles de tratar.

OXIDACIÓN TÉRMICA: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.



Figura nº 1: Diagrama de funcionamiento de los sistemas de oxidación térmica. Modificado de *Sistemas y Tecnologías Ambientales*. www.sta-at.com

Los sistemas de oxidación o incineración pueden dividirse, a su vez, en dos tipos: oxidación térmica, cuyo funcionamiento es el descrito anteriormente y oxidación catalítica.

La **oxidación catalítica** es un proceso destructivo similar a la oxidación térmica pero que tiene lugar a más baja temperatura debido a la presencia de un catalizador. La temperatura habitual de funcionamiento es de entre 250 a 400 °C. Los sistemas de oxidación catalítica tienen un menor consumo energético que los de oxidación térmica ya que la reacción de oxidación se realiza a más baja temperatura; por tanto, existe un menor riesgo de formación de subproductos indeseables de oxidación. Como contrapartida, los catalizadores con el tiempo van perdiendo su eficacia y deben ser repuestos cada 2-5 años, lo que supone un coste de gestión del catalizador agotado como residuo y además un coste de adquisición del nuevo catalizador. La eficiencia de depuración de los sistemas catalíticos suele ser superior al 98%.

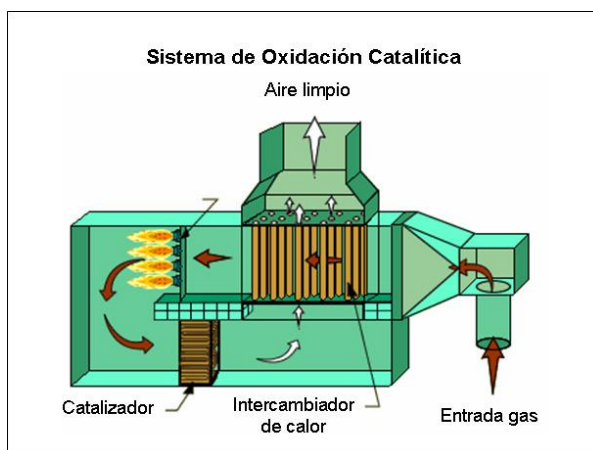


Figura nº 2: Esquema de una instalación de oxidación catalítica. (www.sta-at.com).

2.2.1.2.- Absorción.

La absorción es un proceso de transferencia de materia en el que el gas contaminante pasa al interior de un líquido en el cual se solubiliza, mediante el empleo de lavadores químicos. En estos lavadores el aire a tratar se pone en contacto con un disolvente. Este disolvente absorbe una cierta cantidad de contaminante de la sustancia olorosa, bajando la concentración en el aire y aumentándolo en la fase líquida, que será más fácil de manipular, almacenar y tratar.

Estos sistemas están diseñados para operar en un amplio rango de eficiencias de remoción entre 70 y 99 %. El factor más importante que afecta la eficiencia de remoción es la solubilidad del contaminante en el líquido, seguido por la temperatura y el pH. (*Cárdenas et al. 2003.*)

La absorción sólo será aplicable en aquellos contaminantes altamente solubles en agua, de hecho, su utilización en plantas de compostaje está ampliamente extendida. Sin embargo, implica varios inconvenientes para las plantas de compostaje:

- Su efectividad se limita a compuestos altamente solubles en agua, y la mayoría de los compuestos orgánicos volátiles (C.O.V.s) no lo son, lo que hace que nunca pueda ser considerado como un tratamiento único.
- El contaminante no es eliminado, sino transferido a otra fase, que posteriormente tendrá que ser tratada. (*Moreno et al, 2.008*).
- Existe la posibilidad de emisión de compuestos clorados y partículas por la chimenea, que provoquen igualmente perjuicio al aire ambiente además de olores.
- Los disolventes químicos, la energía, el mantenimiento y el agua empleada encarecen en gran medida el proceso.
- Una vez utilizados, los disolventes deben ser desechados de manera correcta. (*E.P.A. 2000*).

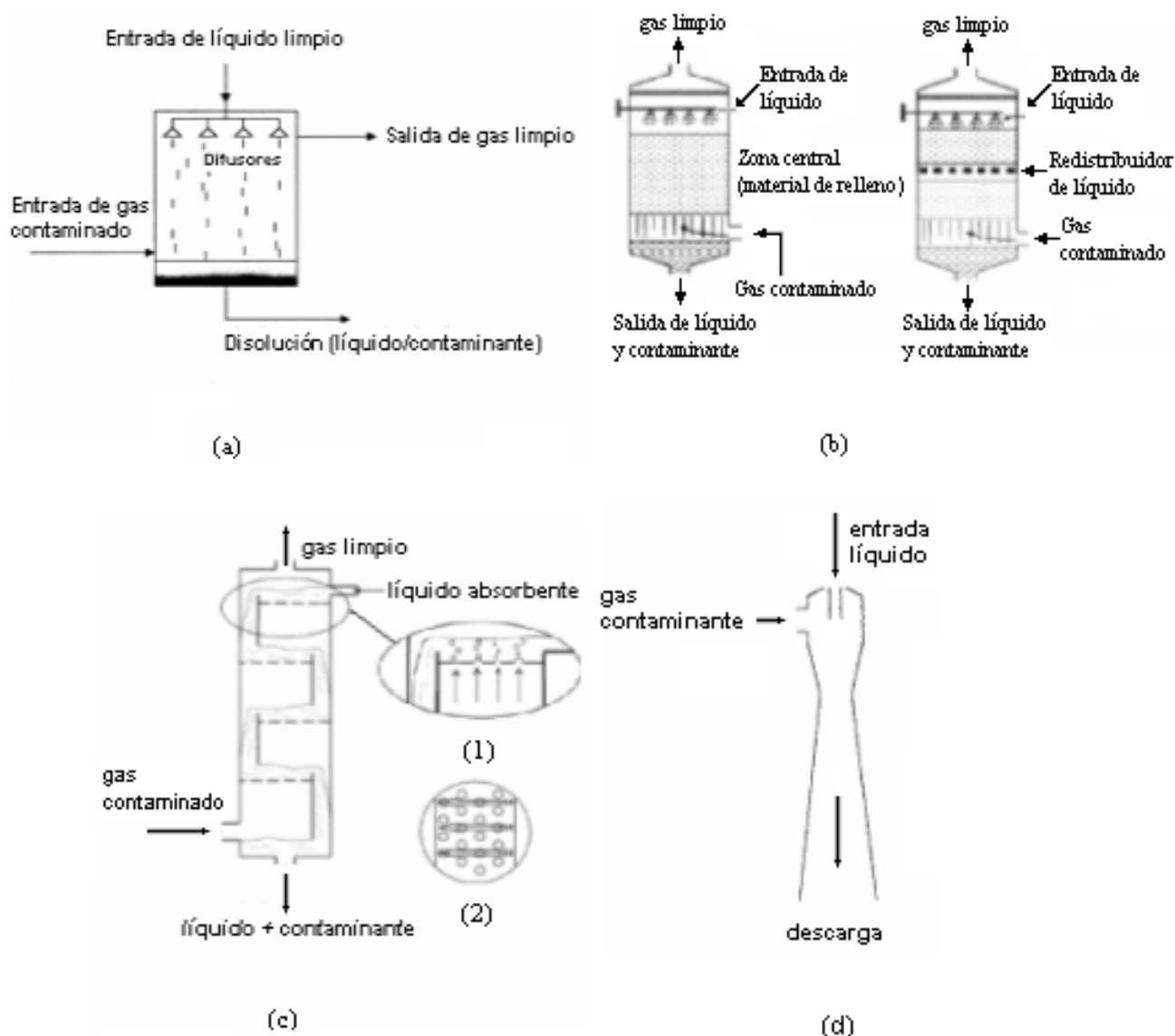


Figura nº 3: Equipos de tratamiento de gases por absorción.

(a) Torre de difusores. El disolvente es introducido como micro gotas por la parte superior mediante el empleo de difusores, lo que aumenta el área de absorción del gas contaminante.

(b) Torres de relleno. Similares a las torres de difusores. La diferencia reside en que en que las torres de relleno poseen en su interior material de relleno que aumenta el tiempo de contacto gas-líquido consiguiendo un mayor grado de absorción.

(c) Torre de platos. El líquido absorbente desciende pasando por unos platos perforados (1), (2) en forma de zig-zag. El gas a tratar asciende por la torre atravesando los orificios que provocan que el gas adquiera forma de burbuja optimizando así su absorción por parte del disolvente.

(d) Lavador de Venturi. Gas y líquido entran perpendicularmente desde un extremo del tubo. *(Tècniques de Tractament i Depuració d'Emissions. UAB. Citado por Fernández, 2007).*

En general, los equipos para el tratamiento de gases por absorción se denominan *scrubbers*, si bien ésta denominación hace referencia actualmente a las torres de relleno, la instalación más ampliamente utilizada.



Fotografía nº1: Ejemplo de Scrubber de la casa comercial *Sistemas y Tecnologías Ambientales*. (www.sta-at.com).

2.2.1.3.- Adsorción.

La adsorción es el proceso de depuración de gases en el que un sólido llamado adsorbente retiene cierto número de moléculas de un fluido (adsorbato) en su superficie. Se distinguen, a su vez, dos tipos de procesos de adsorción: la adsorción física y la química.

La primera de ellas es debida a las Fuerzas de Van der Waals que se establecen entre las moléculas del gas contaminante y la superficie del sólido. Este tipo de unión es débil lo que permite que el sólido empleado como filtro sea fácilmente regenerado para volver a ser utilizado.

La absorción química tiene lugar al interactuar las moléculas del gas contaminante con las moléculas del sólido. El tipo de unión que se establece es de gran intensidad, impidiendo que el sólido empleado pueda ser reutilizado.

El hecho de que la adsorción sea de tipo físico o químico adquiere gran importancia al ser un factor a tener en cuenta la posibilidad de poder recuperar el sólido, ya que de no poder hacerse, el proceso se encarece en gran medida.

El carbón activo es uno de los materiales adsorbente más utilizados al poseer una estructura altamente porosa, ser moderadamente fácil recuperarlo y alcanzar eficiencias de entre un 95 y 98 %. Este tipo de filtro es el más simple y barato pudiéndose instalar desde equipos de pequeño tamaño hasta instalaciones para el tratamiento de grandes caudales.

Aunque la adsorción es una técnica ampliamente utilizada en procesos de ingeniería, su aplicación en el campo del compostaje es muy limitada, básicamente a causa del elevado coste y duración limitada de los materiales adsorbentes, así como por el hecho de que, de nuevo, la adsorción sólo supone una transferencia entre fases y no una eliminación real del contaminante. (*Moreno et al, 2.008*).

ESQUEMA FUNCIONAMIENTO FILTRO DE CARBÓN ACTIVO.

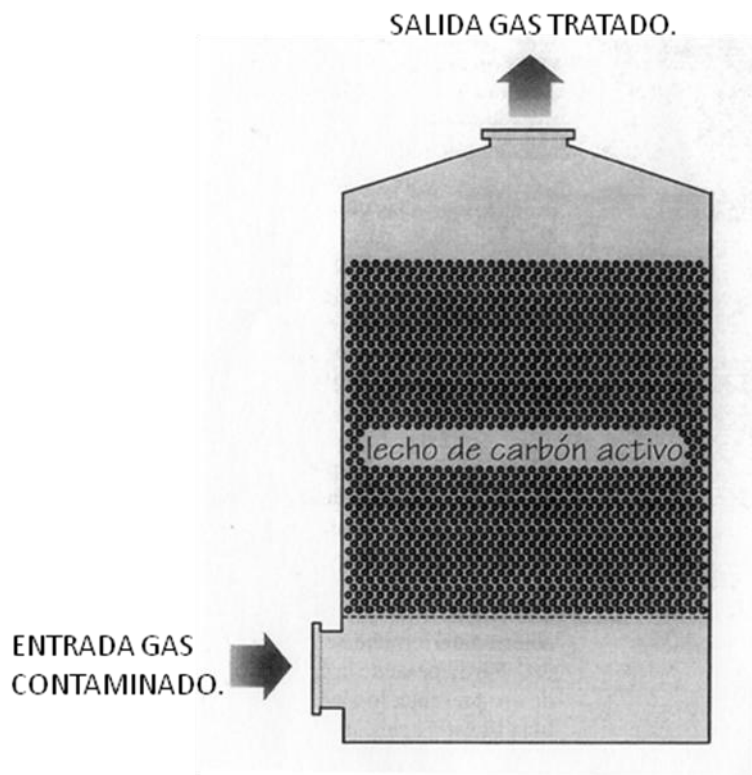


Figura nº 4: Esquema de funcionamiento de un filtro de carbón activo. *(Modificado de Klaus, 1999.)*

2.2.1.4.- Condensación.

Proceso en el cual las sustancias que provocan olores desagradables o son consideradas contaminantes, son extraídas de la corriente gaseosa mediante el cambio de fase desde el estado gaseoso a líquido. Esto se logra incrementando la presión del gas o reduciendo su temperatura, (en algunos casos la combinación de ambos). En general, se recurre al descenso de la temperatura del gas a tratar ya que el incremento de la presión convierte a la condensación en un proceso de descontaminación de gases poco económico.

Al enfriar una corriente de aire que contenga gases contaminantes, los gases con un punto de condensación bajo se condensarán antes y podrán separarse del resto.

Este método se suele aplicar utilizando agua como refrigerante. Normalmente se establece un circuito cerrado de refrigeración en tubos en un largo recorrido dentro de una cámara horizontal, por la que de forma independiente, se hace circular la corriente de aire contaminado, de manera que tenga el contacto más íntimo posible con los tubos refrigerantes. De esta forma, el aire contaminado que al entrar por la parte de arriba de un extremo de la cámara está a una temperatura, sale por la parte superior del otro extremo depurado, habiéndose condensado a lo largo del trayecto, por enfriamiento, los gases que se haya previsto separar, se extraen en forma líquida por la parte inferior de la instalación. (*Seoáñez, 2002*).

La eficacia que puede llegar a alcanzar un condensador para el tratamiento de gases es como mucho de un 90 %.

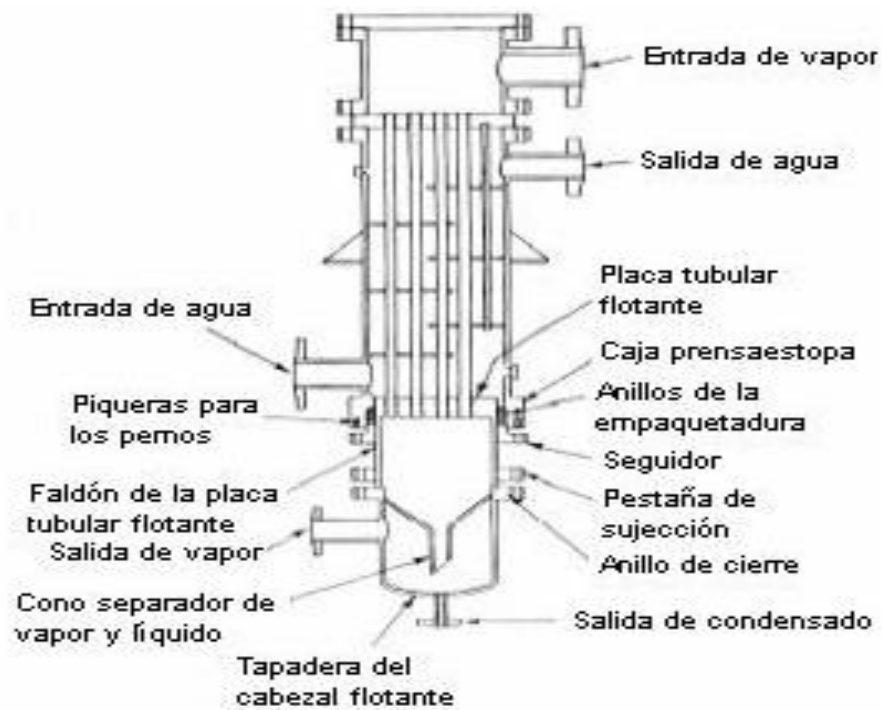


Figura nº 5: Esquema de un equipo de condensación para depuración de gases. El líquido refrigerante circula a través de las tuberías interiores en la superficie de las cuales condensa el contaminante que es extraído del condensador por la parte inferior. (*Tècniques de Tractament i Depuració d'Emissions*. UAB. Citado por Fernández, 2007).

2.2.2.- Sistemas de control biológicos.

Frente a los métodos clásicos de tratamiento de gases, surgieron métodos alternativos que intentaban suplir las carencias de los anteriores. Son denominados métodos de desodorización biológicos al considerar que se trata de tecnologías limpias o tecnologías verdes.

El funcionamiento de los sistemas de control de tipo biológico se basa en la amplia capacidad y alta eficiencia de los microorganismos para degradar los contaminantes del aire. En los métodos biológicos se fuerza la corriente de aire contaminada a través de materiales de relleno que sirven como soporte para el crecimiento y desarrollo de biomasa que se alimenta de los componentes contaminantes del aire. Los microorganismos presentes en el material de relleno utilizan el aire contaminado como fuente de carbono y energía.

El proceso general de degradación de los contaminantes incluye complejas interacciones físicas, químicas y biológicas que dan como resultado la transformación de los contaminantes en otras sustancias con un menor impacto sobre el medio ambiente y la salud humana. (*Shareefdeen, 2005*).

El tipo de microorganismo presente en cualquiera de los métodos biológicos puede ser del tipo bacterias, hongos y levaduras si bien, la presencia de uno u otro microorganismo está condicionada por el tipo de contaminante presente en el gas a tratar.

Los contaminantes producidos como consecuencia de reacciones naturales, como son la mayoría que son provocadores de malos olores, (EDAR, fábricas de compost, industrias agroalimentarias...), son fácilmente biodegradables.

La degradación puede ser llevada a cabo usando las poblaciones naturales de microorganismos, o bien, mediante la inoculación de microorganismos específicos.

En los sistemas biológicos de tratamiento de gases, las partículas contaminantes no pueden ser degradadas directamente desde la fase gaseosa, los contaminantes y el oxígeno han de ser transportados hacia una fase líquida en la que serán accesibles para los microorganismos.

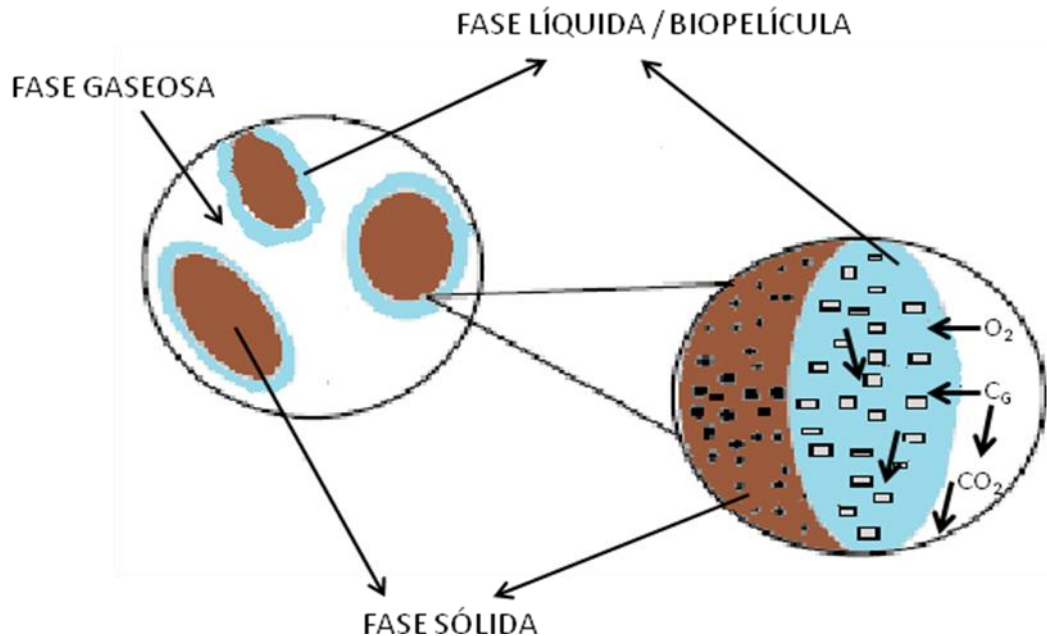


Figura nº6: Mecanismo de degradación del contaminante. Las partículas contaminantes (C_G), han de ser transportadas dentro de la biopelícula que se forma alrededor del sólido de relleno para ser accesibles para los microorganismos. (Modificado de Devinny et al, 1999 y de Cárdenas et al, 2003.)

En función del estado en el que se encuentren la fase líquida y los microorganismos dentro del sistema de tratamiento, se clasifican los métodos de tratamiento de gases de la siguiente manera:

Tabla nº 2: Clasificación de los biofiltros en función de cómo se encuentren la fase líquida y biológica. (Modificado de Cárdenas et al. 2003.)

Tipo de biofiltro.	Fase biológica.	Fase líquida.
BIOLAVADOR	<i>Dispersa</i>	<i>En movimiento</i>
BIOFILTRO DE LECHO	<i>Inmovilizada</i>	<i>En movimiento</i>
ESCURRIDO		
BIOFILTRO DE LECHO FIJO	<i>Inmovilizada</i>	<i>Inmóvil</i>

Además de los sistemas señalados, denominados genéricamente como biofiltros, existen otros métodos que han de ser incluidos como métodos de tratamiento de tipo biológico. Todos estos métodos están en la actualidad siendo desarrollados como métodos de control de olores. En algún caso, el desarrollo de los mismos comenzó en la década de los noventa y por tanto, son tecnologías que todavía están siendo mejoradas. Aunque no serán descritas en el trabajo de manera extensa, han de ser citados como tratamientos de tipo biológico y como una posible alternativa a tener en cuenta.

- **Fotobiodegradación.** Método desarrollado por científicos japoneses a principio de 1.990, utiliza algas como biomasa para la degradación de compuestos olorosos que contengan nitrógeno. La eficacia de este método alcanza el 65 %, aunque actualmente, está siendo desarrollado. Empleado en procesos de combustión principalmente.
- **Bioreactores de membrana.** Los contaminantes gaseosos son transferidos de fase gaseosa a líquida. Ésta es forzada a atravesar una serie de membranas en las que se encuentran los microorganismos encargados de la degradación de los compuestos contaminantes u olorosos. (*Shareefdeen, 2005*).
- **Tanques de lodo activado.** Aunque no es una tecnología moderna, (su utilización se remonta cuatro década atrás), es uno de los métodos biológicos existentes. Su funcionamiento es muy similar al de los biofiltros, utilizando como medio de soporte de los microorganismos el lodo. Su utilización está condicionada por la gran corrosión que se produce en las instalaciones necesarias y la baja capacidad del sistema para el tratamiento de grandes corrientes de aire y olores de alta intensidad. (*E.P.A. 2000*)

En términos generales, el nivel de eficacia alcanzado por los métodos biológicos puede ser comparable al nivel de eficacia alcanzado por cualquiera de los métodos clásicos. El límite de estos procesos es la biodegradabilidad de los contaminantes, en donde los compuestos generados por procesos biológicos son fácilmente biodegradables, mientras que aquellos con estructuras químicas no naturales pueden ser más recalcitrantes. (*Cárdenas et al. 2003.*)

2.2.2.1.- Biofiltros convencionales o de lecho fijo.

Los biofiltros de lecho fijo o inmóvil se componen de un material filtrante, (que puede ser orgánico o sintético), retenido en un recinto a través del cual se hace circular la corriente de aire a tratar.

El material filtrante, que es conocido también como material de relleno o lecho biológico, sirve como soporte para que los microorganismos que se encargarán de la degradación del contaminante, desarrollen una biopelícula a la que serán transportadas las partículas contaminantes. En el caso de que el material de relleno sea de tipo orgánico, éste sirve en ocasiones como fuente de nutrientes para los microorganismos.

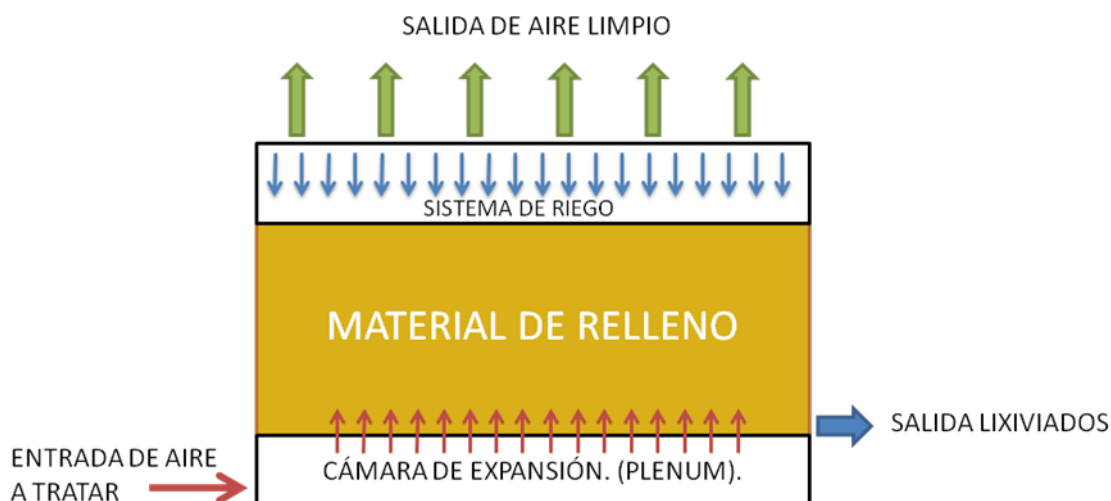


Figura nº7: Esquema general de funcionamiento de un biofiltro de lecho fijo. (Elaboración propia).

Ejemplos de material filtrante utilizado como soporte de la biomasa en este tipo de biofiltros son diferentes tipos de compost, material vegetal triturado, corteza de pino, e incluso residuos orgánicos. En el caso de utilizarse material filtrante considerado como de tipo inorgánico, suelen emplearse rocas porosas (greda volcánica, perlita...), carbón activo.

La utilización de materiales sintéticos presenta la ventaja frente a los materiales orgánicos de no sufrir biodegradación, aumentando así, su vida útil (ésta puede llegar a ser de unos 8 años frente a los 2 años de vida media de los materiales orgánicos). Al evitarse dicha degradación, en los biofiltros que emplean materiales sintéticos no tiene lugar compactación del medio de relleno y la aparición de camino preferenciales.

Frente a las ventajas, surge el inconveniente del precio elevado que poseen los materiales de tipo inorgánico. Esta característica hace que sólo puedan ser empleados en biofiltros de pequeño tamaño para el tratamiento de corrientes gaseosas de bajos caudales.

En este tipo de biofiltros de lecho inmóvil, no existe una fase acuosa móvil que se haga pasar contra corriente al gas a tratar. Por lo tanto, se ha de suministrar suficiente humedad al medio filtrante para que se pueda crear la biopelícula y los contaminantes puedan ser degradados por los microorganismos que la forman. Esta humedad es aportada al medio por un sistema de riego ubicado en la parte superior del biofiltro. Esta característica hace que los biofiltros de lecho fijo puedan ser utilizados para degradar sustancias contaminantes y olorosas poco solubles en agua.

El difícil control del nivel de humedad necesario en el material de relleno, mediante la adicción de agua por parte del sistema de riego, así como la más que posible presencia de contaminantes capaces de inhibir la actividad microbiana hace que en ciertos casos la instalación de un biofiltro de estas características, se acompañe de un pre tratamiento del gas mediante un humidificador o un lavador (scrubber).

Aparte de la instalación de un lavador previo, en ocasiones, para el tratamiento de una misma corriente gaseosa se instalan varios biofiltros en serie, tanto de forma horizontal como vertical.



Fotografía nº 2: Biofiltro de 5 lechos superpuestos de material filtrante inorgánico para el tratamiento de los olores de una granja avícola. (www.sta-at.com)

Los biofiltros de lecho fijo pueden ser contruidos a cielo abierto, bajo cubierta o totalmente cerrados.

Decidir el tipo de biofiltro a construir estará influenciado, aparte de por la disponibilidad presupuestaria, por el caudal de gas a tratar. Grandes caudales de gas contaminante necesitarán de biofiltros de gran tamaño para los que será necesario obra civil y por lo tanto serán muy difícilmente cerrados o instalados bajo cubiertas.

Por otro lado, para el tratamiento de caudales menores existe la posibilidad de la instalación de biofiltros de pequeño tamaño que son contruidos en pequeños módulos metálicos o plásticos que pueden ser introducidos bajo cubiertas o directamente cerrados en su parte superior.



Fotografía n° 3: Ejemplo de biofiltro construido con módulos plásticos para el tratamiento de caudales de aire bajos. (www.weidneriberica.com)

La eficiencia alcanzada por los biofiltros de relleno es superior al 90 % para la mayoría de los gases provenientes de procesos industriales (producción de compost, estaciones depuradoras, industrias agroalimentarias, instalaciones ganaderas), pudiendo alcanzar valores superiores para corrientes con compuestos azufrados y nitrogenados.

Al tratar el presente trabajo sobre un biofiltro de este tipo, todas las características sobre su construcción, funcionamiento y manejo serán descritas con detalle en el punto 2.2. del documento.

2.2.2.3.- Biolavadores o bioscrubber.

El proceso de biolavado difiere en gran medida de los dos tratamientos biológicos de depuración de gases descritos anteriormente.

En los biolavadores en primer lugar, el compuesto a degradar es absorbido en una fase líquida localizada en una torre de absorción llena de líquido. La operación consiste en hacer fluir el gas a contracorriente a través del líquido, donde los contaminantes y el O₂ son absorbidos.

En una segunda fase, el líquido proveniente de la torre es conducido hacia un reactor en el que se produce un proceso de depuración del agua contaminada mediante la utilización de microorganismos y la adicción de nutrientes, o bien es conducido hacia la cabecera de la depuradora donde se incluye en el proceso de depuración general del agua contaminada.

Los biolavadores son los sistemas más adecuados para el tratamiento de compuestos muy solubles en agua.

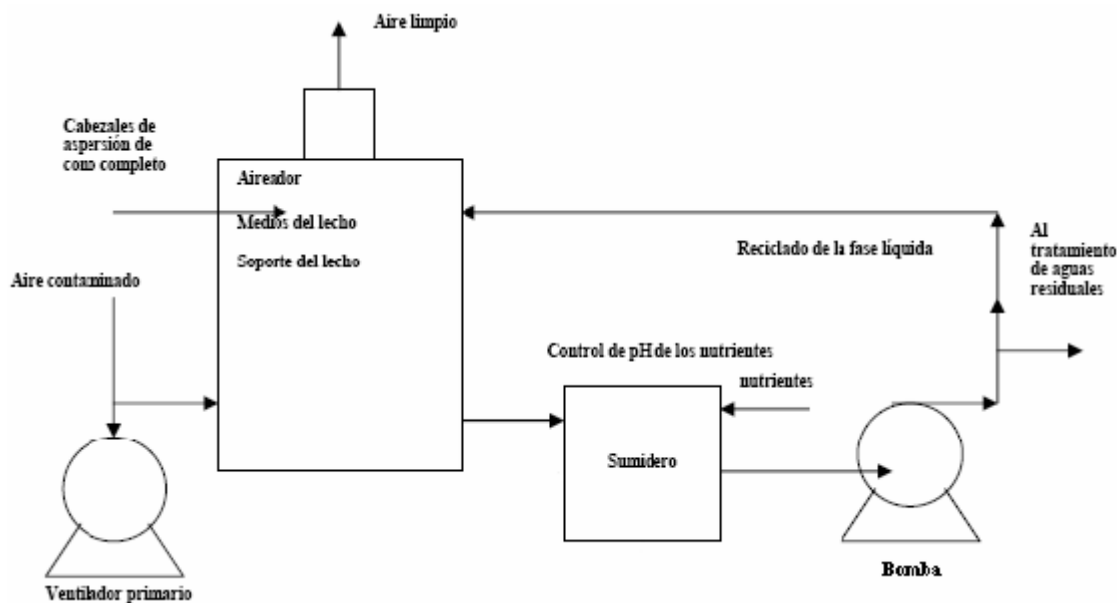


Figura nº 9: Esquema de funcionamiento de un biolavador para tratamiento de gases contaminados. (E.P.A., citado por Fernández 2007).

2.2.3.- Pautas para la selección de un sistema de control de corrientes odoríferas.

Una vez descritos los métodos más importantes para el tratamiento de gases contaminantes causantes de malos olores, se hace necesario el señalar una serie de pautas que faciliten la elección de uno u otro método. La siguiente figura facilita la elección basándose en el caudal de aire a tratar y la concentración de sustancias contaminantes. Esta clasificación está ampliamente extendida y es aceptada, hoy en día, por la totalidad de autores que realizan trabajos sobre biofiltración.

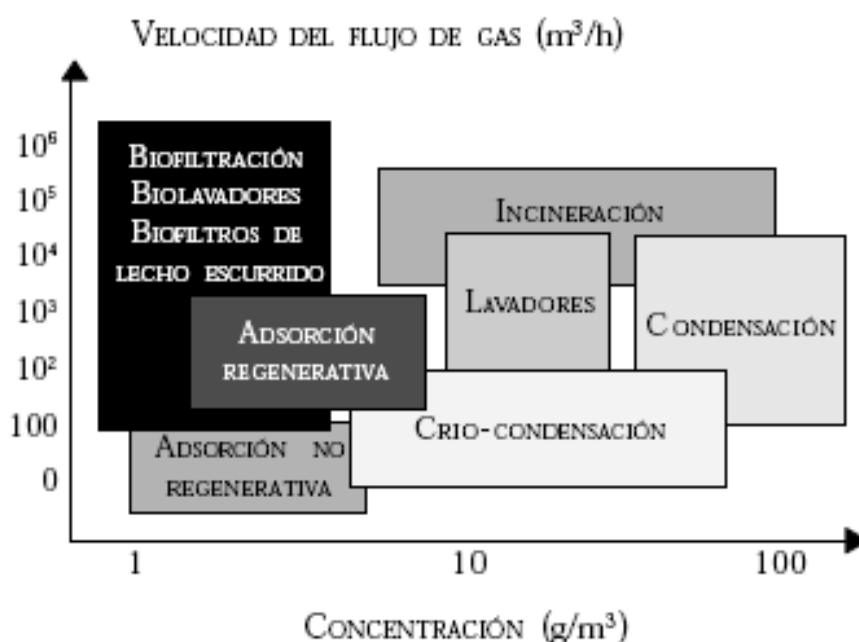


Figura nº 10: Clasificación de las distintas tecnologías para la depuración de gases en función del caudal de aire a tratar y la concentración de partículas contaminantes. (Modificado de Cárdenas et al, Devanny et al, 1999 , www.sta-at.com).

La selección de uno de los sistemas de biofiltración para el tratamiento de la corriente ha de realizarse teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que presentan los distintos tipos de biofiltros. Éstas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla nº 3: Tabla resumen de las ventajas y desventajas de los equipos de tratamiento de tipo biológico para la eliminación de gases contaminantes y oloresos. (Modificado de Cárdenas et al, 2003).

TIPO DE BIOFILTRO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
BIOFILTRO CONVENCIONAL. (LECHO FIJO).	<ul style="list-style-type: none"> • Altas superficies de contacto gas-líquido. • Fácil puesta en marcha y manejabilidad. • Inversión inicial baja y bajos costes de mantenimiento. • Soporta periodos sin alimentación. • Produce caudales de desecho bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificil control de los factores de funcionamiento. • Requiere de grandes superficies. • No conveniente para tratamiento de contaminantes cuyos subproductos sean compuestos ácidos.
BIOFILTRO PERCOLADOR. (BIOTRICKLING).	<ul style="list-style-type: none"> • Control de concentración de sustratos a degradar. • Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. • Equipos compactos con respecto a los biofiltros convencionales. • Poca pérdida de carga en el gas tratado. • Alta transferencia de oxígeno y del contaminante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad de microorganismos. • Generación de lodos. • No resiste periodos sin alimentación. • Necesidad de suministrar nutrientes. • Inversión inicial muy elevada. • Costes de operación y mantenimiento elevados. • Producción de agua de desecho que debe ser tratada.
BIOLAVADOR.	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor control de la reacciones. • Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. • Equipos compactos. • Baja caída de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad de microorganismos. • No soporta periodos sin alimentación. • Genera lodo residual que ha de ser tratado. • Necesidad de instalación de equipos de oxigenación. • Alto coste de inversión, operación y mantenimiento. • Necesidad de suministrar nutrientes.

2.3.- Biofiltros convencionales.

Como se ha señalado anteriormente, en el presente apartado del documento se realiza una descripción de las características y el funcionamiento de los biofiltros convencionales.

2.3.1- Antecedentes de la biofiltración.

Las primeras reseñas bibliográficas sobre la biofiltración como método de tratamiento de gases aparecen en el año 1.923, cuando se empleó suelo poroso para la eliminación de H₂S proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Hasta el año 1.934 no se realizó la primera patente de un biofiltro y los primeros manuales de diseño y funcionamiento no se redactaron hasta la década de 1.950.

Hacia 1.970 se desarrollaron nuevos diseños que permitían mayor carga de trabajo y el aumento en la eficacia para el tratamiento de olores. Estos diseños fueron desarrollados principalmente en Alemania y los Países Bajos y ya no utilizaban suelo como material de relleno, sino compost y restos de poda. Durante los años 70, las legislaciones de varios países en cuanto a la contaminación atmosférica y la afectación socio-ambiental de los malos olores se endurece, pasando a considerarse sustancias tóxicas varias que hasta entonces no lo habían sido. Las legislaciones más estrictas en este aspecto son redactadas en los Países Bajos y en Alemania lo que genera un incremento del desarrollo de la investigación, de la formación de empresas de diseño de biofiltros y el registro de patentes en estos países.

En la década siguiente, aparecen biofiltros más evolucionados (se emplean ya controles informáticos en el funcionamiento) y se desarrollan los biofiltros cerrados. Se comienza a utilizar nuevos materiales de relleno de tipo sintético. En estos años, se desarrollan los primeros modelos de biofiltros percoladores en la Universidad Tecnológica de Eindhoven, y son varias las plantas de tratamiento de aguas residuales de Alemania

que tienen instalados biofiltros para el tratamiento de olores. Las empresas constituidas en la década anterior extienden su tecnología por todo el mundo.

Es durante esta época y la siguiente década, (1990), cuando la tecnología de la biofiltración comienza a interesar en Estados Unidos, formándose varios grupos de investigación en universidades del país. Desde los noventa, el interés por la biofiltración se ha incrementado considerablemente en todo el mundo aumentando el número de aplicaciones y diseños.

En la actualidad, la investigación desarrollada se centra en el diseño de sistemas de control de los parámetros que intervienen en los procesos de degradación de los compuestos y en la aplicación de modelos matemáticos que permitan comprender mejor los sistemas de biofiltración.

2.3.2.- Biofiltros convencionales: fundamentos.

Los factores que afectan al funcionamiento del biofiltro una vez puesto en marcha son varios, debiendo estar perfectamente controlados para la correcta degradación de los contaminantes. Los factores que han de ser estudiados son: una correcta selección del medio filtrante, así como la temperatura, la humedad y el pH del medio.

Una correcta selección de los microorganismos responsables de la degradación de los contaminantes.

Control de las características del gas portador de dichos contaminantes, así como el control de la presencia de compuestos tóxicos que pudieran inhibir el desarrollo de la comunidad microbiana. Estos factores se describen a continuación.

2.3.2.1.- Selección del medio filtrante o material de relleno.

La selección del material de relleno del biofiltro está directamente relacionada con el correcto funcionamiento y el grado de eficacia que éste alcance. El material de relleno del biofiltro es el hábitat en el que se va a desarrollar toda la comunidad microbiana que es, finalmente, la encargada de la degradación del contaminante.

La elección de un tipo de material u otro será determinada por el cumplimiento de las condiciones que hagan que el desarrollo de los microorganismos se vea favorecido, sin embargo, se ha de tener en cuenta el aspecto económico.

El gran espacio requerido para la instalación de los biofiltros y en consecuencia, el volumen de material de relleno necesario hace que sea indispensable que el material empleado tenga alta disponibilidad y bajo coste de adquisición.

Son varios los autores que, actualmente, fijan el criterio para la elección del material filtrante en el cumplimiento de las características siguientes. (*Devinny et al, 1999*).

- Porosidad homogénea, entre el 40 y el 80% del total del lecho filtrante.

- Alta capacidad de retención de agua.
- pH Neutro.
- Alta superficie específica.
- Alta resistencia a la compactación.
- Presencia de nutrientes inorgánicos como N, P, K y S y alta concentración de microorganismos.
- Alto contenido de materia orgánica, entre el 35 y 55 %.

A estas características habría que sumarles una serie de consideraciones. (*Saña, 2010*).

- La granulometría del material ha de ser en más del 60 % superior a 4 cm.
- El contenido en finos ha de ser el mínimo posible, ya que su presencia afectaría a la pérdida de carga del gas a tratar.
- Se debe evitar la presencia de sustancias inhibitoras de la actividad microbiana como es el caso de las especies resinosas.

Los materiales utilizados para la biofiltración pueden variar de forma importante, pudiendo ser sólidos porosos orgánicos, sólidos inorgánicos naturales o materiales sintéticos (*Devinny et al., 1999*).

Los materiales de tipo orgánico más utilizados, son turba, compost, viruta de madera, lodos de plantas de tratamiento de agua, cortezas de distintas especies. Dentro de los medios inorgánicos se incluyen el carbón activo, greda volcánica y la perlita (*Kennes y Thallasso., 1998, citado por Etcharen, 2005*).

Todos estos materiales han sido eficazmente utilizados en biofiltración, junto a los de tipo sintético como anillos de polipropileno, y las espumas de poliuretano. La siguiente tabla resume, de forma general, las características de todos ellos.

Tabla n° 4: Resumen de las características de distintos materiales empleados como medio filtrante en biofiltros convencionales. (Modificado de Devanny et al., 1999).

Parámetro	Compost	Turba	Suelo	Carbón activo, perlita	Material sintético
Densidad poblacional de microorganismos	Alta	Media-baja	Alta	Ninguna	Ninguna
Área superficial	Media	Alta	Baja - Media	Alta	Alta
Permeabilidad al aire	Media	Alta	Baja	Media-alta	Muy alta
Contenido de nutrientes asimilables	Alta	Media-alta	Alta	Ninguna	Ninguna
Absorción de contaminantes	Media	Media	Media	Alta	Alta
Tiempo de vida útil	2-4 años	2-4 años	>30 años	>5 años	>15 años
Costo	Bajo	Bajo	Muy bajo	Medio-alto	Muy alto

A menudo un biofiltro con medio orgánico como material filtrante, presentará alto potencial de compactación y por tanto baja superficie específica y baja porosidad, es por esta razón que se han incorporado materiales inorgánicos en la cama filtrante como la perlita (sílice), granos de cristal, espumas de poliuretano, o poliestireno (Warren et al., 1997, citado por Etcharen, 2005).

En general, a la hora de realizar una selección de material filtrante de tipo orgánico e impedir en gran medida la aparición de compactación del lecho filtrante, lo recomendable es el uso de fracción leñosa precompostada. (Saña, 2010).

2.3.2.2.- Efectos del pH.

El rango de pH considerado como óptimo para el correcto funcionamiento de los biofiltros se encuentra entre pH-6 y pH-8, ya que dentro de este rango se desarrolla la comunidad microbiana adecuada y las reacciones llevadas a cabo por ella para la degradación de las partículas contaminantes se ven favorecidas.

Sin embargo, en un gran número de ocasiones los gases a tratar (H_2S , nitratos, cloruros), son transformados por los microorganismos en ácidos (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl), que disminuyen de forma drástica el pH del material de relleno del biofiltro.

La disminución del pH generada como consecuencia de la degradación de las partículas contaminantes es perjudicial para el mantenimiento y proliferación de los propios microorganismos por lo que, de no corregirse, el funcionamiento del biofiltro se detiene. Esta no es la única consecuencia generada por la disminución del pH. Se ha de tener en cuenta que los ácidos generados degradan a gran velocidad el material de relleno y por lo tanto el tamaño de las partículas que lo componen disminuye. Como consecuencia de todo lo anterior, se produce una compactación del material de relleno y la aparición de caminos preferenciales. Incluso puede llegar a producirse un taponamiento de los conductos de introducción del gas en el biofiltro. En casos extremos la acidificación del medio puede conducir incluso, a la degradación del material de soporte del biofiltro, como estructuras de hormigón y metálicas.

A la hora del diseño del biofiltro se ha de tener en cuenta la más que posible disminución del pH que tendrá lugar, y por tanto ha de ser elegido un material de relleno con una buena capacidad tampón. Sin embargo, el tipo de materiales empleados como materiales de relleno en biofiltros no poseen esta característica, por lo que se hace necesario la mezcla con materiales capaces de corregir el pH.

La gran mayoría de referencias sobre este aspecto señalan al carbonato cálcico como la sustancia a emplear para corregir el pH del material filtrante. La forma en la que este corrector del pH suele ser añadido es, mediante el mezclado del material de relleno con conchas marinas trituradas. Una relación típica de mezcla es de 25 kg de conchas marinas por cada metro cúbico de material filtrante (*Devinny et al., 1999*).

Otra de las posibles soluciones empleadas para el mantenimiento de los niveles de pH es el empleo de greda volcánica. Este material resiste las variaciones de pH y no presenta, por tanto, problemas de compactación. Sin embargo presenta como inconveniente su alto coste.

El método más empleado para el control del pH del material de relleno es la instalación, previa a la entrada del biofiltro, de un sistema de eliminación de todas las sustancias contenidas en el aire a tratar que pudieran acidificar al material de relleno. En general, para la eliminación de amoníaco y ácido sulfhídrico se recurre a la instalación de torres

de lavado con ácido y agua respectivamente que evitan la entrada de estos compuestos al material de relleno del biofiltro.

Tras este pretratamiento, el gas introducido en el biofiltro es liberado de sustancias que pudieran generar, tras su degradación, la acidificación del medio filtrante.

2.3.2.3.- Pérdida de presión del gas tratado.

La pérdida de presión del gas en el interior del material de relleno del biofiltro es perjudicial, ya que incrementa la potencia necesaria en el sistema de extracción del gas y por tanto los costes económicos de funcionamiento de las instalaciones.

Éste hecho se da como consecuencia de la suma de muchos de los factores que influyen en el correcto funcionamiento: materiales de relleno con poros de pequeño tamaño, disminución del pH y por tanto degeneración del material, aportación excesiva de agua de riego que sature los poros del relleno, compactación excesiva...

A la hora de realizar el diseño de los biofiltros las caídas de presión del gas a tratar se deben tener en cuenta al determinar la altura que ha de tener el material de relleno. Lechos de filtrado demasiado altos conllevan pérdidas de presión del gas excesivas y un aumento del tiempo de residencia del gas a tratar dentro del material. Lo que puede provocar el aumento de metabolitos provenientes de la oxidación de los contaminantes que perjudiquen al medio de relleno mediante su acidificación, su saturación o la inhibición de las reacciones de oxidación.

Para evitar las caídas de presión excesivas se utilizan generalmente lechos de filtrado que se encuentran en el rango de 0,90 a 1,5 m de altura. Pudiéndose llegar a alturas de 2 metros para materiales orgánicos precompostados, por presentar mayor estabilidad. Para el caso de materiales de relleno inorgánicos la altura puede incrementarse, obteniéndose biofiltros más compactos.

La pérdida de presión del gas a tratar es uno de los indicadores más fiables a la hora de determinar el grado de deterioro y compactación del material de relleno, y por tanto su correcto control es un indicador de la necesidad de sustitución del material filtrante. En general, varios autores recomiendan que el material de relleno del biofiltro sea reemplazado cuando la caída de presión supere los 1.000 Pa. (*Devinny et al., 1999, Schroeder, 2002 citado por Etcharen, 2005, Saña, 2010*).

2.3.2.4.- Contenido en humedad del biofiltro.

Como previamente se ha señalado cuando se describieron las características que ha de poseer el material de relleno de los biofiltros, éstos han de poseer una buena capacidad de retención de agua, ya que de esta característica depende la formación de la biopelícula y la solubilización en la misma de las partículas contaminantes que serán atacadas por los microorganismos.

Hoy en día, parece mayoritariamente aceptado, que el contenido en humedad que ha de poseer el material filtrante ha de situarse entre un 40 % y un 60 %. (*Warren et al 1997, citado por Etcharen 2005, Cárdenas 2003, Devinny et al., 1999*). La gran dificultad para mantener el nivel de humedad dentro de este rango hace que sea uno de los principales problemas de manejo de los biofiltros, aunque existen alternativas que actualmente facilitan el mantenimiento.

Un exceso del contenido en humedad del material filtrante, genera la aparición de zonas de saturación que favorecerán la anaerobiosis, aumentarán las pérdidas de carga del gas y el aumento del tiempo de residencia del mismo en el material filtrante. Por otro lado, un contenido excesivo de agua en el material de relleno puede generar un lixiviado que lave los nutrientes necesarios para las reacciones microbianas, o incluso que genere un lavado de los propios gases a degradar. Con lo que el funcionamiento del biofiltro pasaría a ser similar al de una torre de lavado.

Un déficit de humedad en el biofiltro ocasiona una disminución de la biopelícula necesaria para la degradación del contaminante por parte de los microorganismos. Ha de recordarse que, para que la degradación del contaminante por parte de los

microorganismos sea llevada a cabo, las sustancias a degradar han de ser solubilizadas en agua junto con el oxígeno necesario. De no ser así, los microorganismos encargados de la oxidación no pueden “atacar” a los contaminantes. (Figura nº 6, Pág. nº 18).

Otra de las consecuencias generadas por un contenido en humedad bajo, es la disminución del tiempo de residencia del gas dentro del material de relleno.

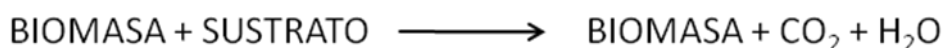
Al disminuir la humedad del lecho, los microorganismos consumen parte de la energía destinada a su crecimiento en succionar agua de la superficie del lecho, lo que limita su metabolismo y por lo tanto la eliminación del contaminante (*Devinny et al., 1999*).

2.3.2.5.- Temperatura del medio filtrante.

El control de la temperatura del material filtrante una vez puesto en marcha el biofiltro, tiene gran importancia a efectos prácticos. Los microorganismos encargados de la degradación son de tipo mesófilo, por lo que pueden desarrollarse a temperaturas que se encuentren entre los 15° C y los 41 °C. La velocidad de degradación aumentará para valores altos del rango y disminuirá para los valores inferiores. Temperaturas inferiores a los 15° C paralizarán la actividad microbiana pero no inutilizarán el biofiltro, que reemprenderá la actividad cuando el nivel de temperatura vuelva a ser el adecuado.

2.3.2.6.- Microorganismos y biopelícula.

La reacción bioquímica que tiene lugar en el proceso de biofiltración es la siguiente, donde el contaminante presente en el gas sería el sustrato: (*Cárdenas et al. 2003.*)



La comunidad microbiana encargada de la degradación del contaminante contenido en el gas, es la misma que se encarga de la degradación de los residuos sólidos urbanos y que es empleada en las estaciones depuradoras de aguas residuales. Para favorecer el mantenimiento y proliferación de las bacterias y hongos que la forman, ha de controlarse de manera exhaustiva, todos los parámetros que puedan influir en sus

actividades metabólicas: temperatura del medio, pH, humedad y disponibilidad de nutrientes.

La lista de especies presentes en sistemas de biofiltración es larga y depende de diversos aspectos, tales como el inóculo inicial, el material filtrante, los contaminantes a tratar y el tiempo de aclimatación. En la siguiente tabla, se presenta una lista de microorganismos comúnmente utilizados para el tratamiento biológico de gases.

Tabla nº 5: Microorganismo presentes en medios de relleno de biofiltros. (Cárdenas et al. 2003.)

CUADRO 6. MICROORGANISMOS MÁS COMUNES USADOS PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE GASES	
BACTERIAS	HONGOS
<i>Actinomicetes</i>	<i>Actinomyces</i>
<i>Micrococcus cephalosporium</i> sp.	<i>Penicillium</i> sp.
<i>Micromonospora vulgaris</i>	<i>Circinella</i>
<i>Bacillus cereus</i>	<i>Cephaloteciun</i> sp.
<i>Streptomicetes</i> sp.	<i>Ovularia</i> sp.
<i>Pseudomonas putida</i>	<i>Stemphillum</i> sp.
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Scedosporium apiospermum</i>
Fuente: García-Peña et al. 2001, Groenestijin y Hesselink 1993.	

Existen diversas opiniones en cuanto al manejo de la población microbiana contenida en los materiales de relleno de los biofiltros.

En primer lugar, a la hora de la puesta en marcha del biofiltro, se ha de decidir entre inocular el medio de relleno o permitir la proliferación natural de los microorganismos. Varios autores son favorables a la inoculación de microorganismos para favorecer la rápida puesta en marcha del biofiltro. Incluso la inoculación con microorganismos específicos para cada gas tratado. Sin embargo, esta práctica es descartada por otros tantos investigadores, que la consideran innecesaria además de provocadora de un encarecimiento de la puesta en marcha del biofiltro. Esta segunda corriente de opinión mantiene que el proceso de aparición y selección de los microorganismos se lleve a cabo de manera natural.

Hay que señalar que en la práctica, la inoculación de materiales de relleno de biofiltros se realiza mediante la adicción al lecho de lodos de depuradora o purines, donde se encuentran contenidos complejas mezclas de especies de microorganismos, asumiéndose que sobrevivirán aquellos microorganismos capaces de degradar el compuesto específico. (*Etcharen, 2005, Saña, 2010*).

Otro de los aspectos a tener en cuenta referido a la población microbiana, es el nutricional. En ocasiones los microorganismos, al no encontrar partículas gaseosas a degradar que les sirvan como fuente de carbono, recurren a la degradación de la materia orgánica que forma parte del lecho. Esta degradación, de prolongarse, provoca una disminución de la granulometría del material generándose fenómenos de compactación, anaerobiosis y aparición de caminos preferenciales. Para impedirlo, se recurre a la adicción al medio filtrante de compuestos nutricionales por fertirrigación. Estos riegos suministran nutrientes a los microorganismos y son empleados además, para el mantenimiento de los niveles de pH correctos. (*Devinny et al., 1999*).

Otro de los aspectos a tener cuenta referido a la población microbiana es la composición de la misma. Como se ha señalado, los microorganismos presentes en los materiales de relleno pueden ser de varios tipos (bacterias, hongos, levaduras...). En la práctica, esta biodiversidad es, en ocasiones, perjudicial. La presencia mayoritaria de hongos en los materiales de relleno, provoca la aparición de gran cantidad de micelio que puede llegar a ocasionar pérdida de carga del gas a tratar. Por esta razón, se recurre a tratamientos fungicidas que impiden el desarrollo de hongos y los perjuicios que éstos ocasionan. (*Saña, 2010*).

En general, la capacidad de degradación de compuestos contaminantes por parte de los microorganismos depende en gran medida del origen del gas a tratar. Compuestos provenientes de procesos biológicos (plantas depuradoras, fábricas de compost, industrias agroalimentarias, mataderos, granjas...), no presentan ningún problema a la hora de ser degradados por parte de los microorganismos. Por esta razón la biofiltración se impone actualmente como método de tratamiento de corrientes contaminantes en este tipo de establecimientos.

2.3.2.7.- Características del gas portador.

Las características del gas a tratar en el biofiltro influyen también en la eficiencia alcanzada. Estas características son:

- El gas tratado ha de ser biodegradable lo cual dependerá de su origen.
- La concentración de compuestos olorosos o contaminantes se considera que no ha de sobrepasar los 5 gr/m³.
- La temperatura del gas no ha de superar los 40 ° C. De ser así, se deberá reducir mediante humidificación. Tampoco ha de ser inferior a los 10 ° C, lo que provocaría una reducción de la actividad microbiana.
- La humedad relativa del gas entrante ha de alcanzar el 99 %. Este nivel de humedad puede alcanzarse mediante dos métodos. Por un lado la instalación previa a la entrada del biofiltro, de una torre de lavado o de columnas de duchas. Y por otro lado, mediante la aportación de agua con un sistema de riego situado en la superficie del lecho filtrante. Este segundo método presenta una eficacia mucho menor en este aspecto.
- No ha de contener partículas que puedan llegar a taponar los conductos de entrada del gas en el biofiltro, así como sustancias tóxicas para la vida de los microorganismos. También en este caso, se hace necesario contar con un sistema de humidificación previa del gas.

2.3.3.- Aplicaciones de la biofiltración.

La instalación de biofiltros como sistema de desodorización de corrientes de aire olorosas depende, en primer lugar y como ya ha sido señalado, del origen del gas a tratar. Siendo éste el sistema seleccionado cuando el origen de la corriente es natural, ya que frente a los sistemas de depuración convencionales, la biofiltración consigue niveles de efectividad semejantes a menor coste. La aplicación de la biofiltración como sistema de desodorización puede ser empleada en varios tipos de industrias:

- EDAR municipales.
- Plantas de compostaje.
- Plantas de tratamiento de biosólidos.
- Plantas de biometanización.
- Granjas y mataderos.
- Vertederos.
- Estaciones de bombeo de agua y alcantarillado.
- Industria química.
- Industria alimentaria.
- Destilerías.
- Industria tabaquera.
- Industria papelera.
- Industria farmacéutica.
- Industria del mueble.
- Aplicación de pinturas y recubrimientos.
- Manufactura de resinas.
- Curtido de pieles.

Actualmente, existen numerosas empresas dedicadas al diseño, construcción y operación de sistemas de biofiltración a escala industrial. Referencias de finales de la década de 1990 indicaban que tan solo en Alemania y en los Países Bajos se encontraban más de 500 biofiltros instalados a nivel industrial. (*Cárdenas et al. 2003.*)

Al no haber en España legislación sobre los límites de las emisiones e inmisiones de olores, (sólo hay referencias generales en algunas disposiciones de Comunidades Autónomas), la afectación socioambiental por los malos olores no ha sido considerada como una problemática grave. Sólo Cataluña tiene redactado un anteproyecto de ley contra la contaminación odorífera que será aprobado en breve. (*Puigvert, 2010.*)

La dificultad que conlleva la redacción de legislaciones reguladoras del nivel de olor soportable no reside sólo en el hecho del establecimiento de un nivel máximo de emisiones, como en la dificultad de elección de uno de los métodos de medida de las concentraciones. En Europa desde febrero de 2005 la norma UNE-EN 13725 “*Calidad del Aire- Determinación de la Concentración de Olor por Olfatometría Dinámica*” surge para cubrir la deficiencia de métodos de medida de los olores y para complementar la Directiva 1999/13/CE (Directiva COV). Es de esperar que, en un plazo corto de tiempo, aparezcan legislaciones en los distintos ámbitos administrativos que pongan límite a la emisión de corrientes de aire olorosas.

Por esta razón, parece claro que han de ser los biofiltros el sistema mayoritariamente instalado para el control de estas emisiones, dada su fácil operatividad, bajo coste y alta eficiencia. Algunos ejemplos de biofiltros industriales instalados ya en España son:

- E.D.A.R.s de Banyeres (Alicante), Oropesa (Castellón), Irún (Guipúzcoa), Vilaseca, Olot, Manresa, depuradoras de Leche Pascual (Aranda de Duero/Burgos), Yoplait (Alcobendas/Madrid), Estrella Levante (Murcia), Cervecería San Miguel (Málaga), Arazuri y Tafalla (Navarra)...
- Plantas de tratamiento de residuos como los Ecoparc de Barcelona, Vertedero El Culebrete de Tudela, (Navarra)
- Plantas de compostaje: Linares (Jaén), Cogersa (Asturias), Lapatx – Azpeitia (Gipuzkoa).
- Plantas de biometanización: Ávila, Iraizoz (Navarra), Tudela (Navarra).
- Plantas de tratamiento de lodos de depuradora: Loeches (Madrid).
- Alcoholera: Agralco (Estella, Navarra).

3.- OBJETIVOS.

La redacción de este trabajo final de carrera persigue fundamentalmente los siguientes objetivos.

- En primer lugar, describir el biofiltro del edificio de tamices instalado en la Estación Depuradora de Aguas Residuales de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona situado en Arazuri.
- Determinar el régimen de funcionamiento inicial del biofiltro mediante el estudio de los siguientes parámetros: humedad y temperatura del material de relleno, concentración de gases causantes de malos olores a la entrada y a la salida del biofiltro, dosis de riego aplicada, caudal de lixiviado del relleno.
- Realizar propuestas ejecutables en el funcionamiento del biofiltro para mejorar la efectividad de funcionamiento de la instalación.

4.- MATERIAL Y MÉTODOS.

4.1.- Descripción del biofiltro de ensayo de Arazuri.

La descripción del biofiltro de ensayo de la Estación Depuradora de Arazuri se llevó a cabo mediante el acceso a información facilitada por el departamento de Medio Ambiente e I + D de la planta.

La documentación aportada por dicho departamento fue el Proyecto de Construcción del biofiltro redactado por la U.T.E. formada por las empresas Cadagua, S.A. y Ferrovial - Agroman Construcción, S.A. El proyecto se denominó, "Biofiltro para edificio de tamices y para los espesadores de EDAR Arazuri."

Además de lo ya señalado, se facilitó material fotográfico de la fase de llenado del biofiltro.

Toda esta información se completó con mediciones efectuadas en la propia instalación del biofiltro y fotografías tomadas durante la fase de toma de datos del ensayo.

4.2.- Dimensionamiento del biofiltro.

Cálculo de los parámetros de referencia para el dimensionamiento de biofiltros.

Son varios los parámetros que han de tenerse en cuenta a la hora de dimensionar un biofiltro para el tratamiento de un determinado caudal de aire. El valor que han de tomar dichos parámetros está, hoy en día, tabulado. Presentándose distintos valores para cada uno de los tipos de corriente a tratar dependiendo de su procedencia.

Los parámetros a calcular son los siguientes:

- *Tiempo de residencia total.* $\tau = \frac{V}{Q}$.

Donde V (m³) es el volumen del biofiltro y Q (m³/s) el caudal de aire a tratar. Este parámetro hace referencia al tiempo que ha de permanecer la corriente de aire en el material de relleno del biofiltro para que los compuestos contaminantes sean accesibles para los microorganismos. Su valor depende de la procedencia de la corriente a tratar, adquiriendo distintos valores para corrientes provenientes de procesos de compostaje, tratamiento de aguas residuales, corrientes provenientes de granjas, industria alimentaria...

- *Tiempo de residencia real.* $\tau = \frac{V \times \theta}{Q}$.

Donde V (m³) es el volumen del biofiltro, Q (m³/s) el caudal de aire a tratar y θ la porosidad del lecho filtrante. Este segundo parámetro se calcula, ya que se considera que el tiempo de residencia total sobrevalora el tiempo de permanencia del gas en el biofiltro al no tener en cuenta la porosidad específica de cada uno de los materiales filtrantes.

El intervalo de referencia entre el que ha de encontrarse el tiempo de residencia total es entre 30 y 60 segundos para los procesos de tratamiento de aguas residuales y para los procesos de compostaje. (Devinny et al, 1.999, Etcharen, 2.005).

- *Carga volumétrica:* $CV = \frac{Q}{V}$.

Donde Q (m³/s) el caudal de aire a tratar y V (m³) es el volumen del biofiltro.

- *Carga superficial:* $CS = \frac{Q}{A}$.

Donde A (m²) es el área superficial del biofiltro y Q (m³/s) es el volumen del biofiltro. Ambos parámetros determinan el caudal de aire que a de soportar cada metro cúbico de material filtrante, dando información acerca del correcto dimensionamiento del biofiltro.

Se considera que la carga superficial y la volumétrica, han de encontrarse entre los 100 y 150 m³/m³h para corrientes de aire provenientes de procesos de depuración de agua y procesos de compostaje. (Devinny et al, 1.999, Etcharen, 2.005).

4.3.- Determinación del régimen de funcionamiento inicial.

4.3.1.- Temperatura del material de relleno.

Las temperaturas que se analizaron durante la toma de datos en el biofiltro estudiado fueron de dos tipos: temperatura superficial del material y temperatura del material de relleno a una profundidad de 75 centímetros. Realizándose mediciones de temperatura de tipo puntual y de tipo continuo.

Para la medición de las temperaturas se utilizó una sonda de la casa *Testo*, modelo *175 - T2* junto con una lanza de acero que permite el acceso a distintas profundidades del material de relleno.

Para el registro de los distintos tipos de temperaturas se dividió la superficie del biofiltro en quince cuadrantes. Las temperaturas puntuales se tomaron de cada uno de estos cuadrantes a la misma hora del día y las temperaturas de tipo continuo fueron tomadas del punto central del biofiltro.



Fotografía nº 4 y nº 5: Sonda para medición de temperaturas *Testo175 - T2* y lanza de acero, (www.testo.es y elaboración propia, respectivamente).

4.3.2.-Humedad del material de relleno.

Se instalaron seis sondas para la medición en continuo del contenido en humedad del material filtrante y al igual que en el caso de las temperaturas, se instalaron en superficie y a 75 centímetros de profundidad.

Para la medición del contenido en humedad del material de relleno del biofiltro se utilizaron sondas de la casa *Delta-T Devices*, modelo *ML 2X*. Los datos fueron registrados en un data logger modelo *DL-6* de la misma casa comercial.



Fotografía nº 6: Sonda de humedad modelo *ML 2X*.



Fotografía nº 7: Data logger modelo *DL 6*, para registro de datos.

4.3.3.- pH del material de relleno.

El estudio del pH del material de relleno utilizado en el biofiltro se realizó mediante el muestreo del material a distintas profundidades. Las muestras recogidas se depositaron en el laboratorio de la Estación Depuradora donde fueron analizadas.

El número de muestras recogidas fue de cinco y las profundidades a las que fueron recogidas fueron las siguientes.

Tabla nº 6: Número de muestras y profundidades a las que fueron recogidas para la elaboración del perfil de pH del material de relleno del biofiltro.

<i>Número de muestra.</i>	<i>Profundidad (cm.)</i>
1	20 cm.
2	40 cm.
3	60 cm.
4	80 cm.
5	100 cm.

Para la recogida de estas muestras se recurrió, en un primer momento, a la utilización de una barrena para la recogida de muestras de suelo. Finalmente, la barrena tuvo que ser sustituida por una azada. En las muestras número 4 y número 5 al estar el material de relleno más degradado y compactado, la barrena sí pudo ser utilizada.



Fotografía nº 8 y nº 9: Momento de la recogida de las muestras número 1 y número 2.



Fotografía nº 10 y nº 11: Momento de la recogida de la muestra número 3 y modo en el que fueron recogidas las muestras número 4 y número 5.

El método utilizado para la determinación del pH en el laboratorio de la planta depuradora fue electrometría. (PE/LCS/0006).

4.3.4.- Altura del material de relleno.

Para la comprobación de los posibles efectos de compactación sufridos por el lecho filtrante del biofiltro, se realizaron mediciones de la altura del material con cinta métrica.

Como complementación a las mediciones de la altura del material y para determinar la aparición de caminos preferenciales en el material de relleno, se realizó una segunda prueba en la que se introdujo humo frío en el sistema de extracción.

La introducción del humo en el material filtrante se llevó a cabo mediante la instalación de una bomba de humo pirotécnica en el interior de la sala donde está instalado el ventilador del equipo de extracción del edificio de tamices. La bomba fue colocada previamente al paso de la corriente por el ventilador para lograr la succión de la mayor cantidad de humo posible.



Fotografía nº 12: Forma en la que fue colocada la bomba de humo frío y fotografía de detalle de la misma.

4.3.5.- Caracterización del gas tratado.

4.3.5.1.- Temperatura y humedad.

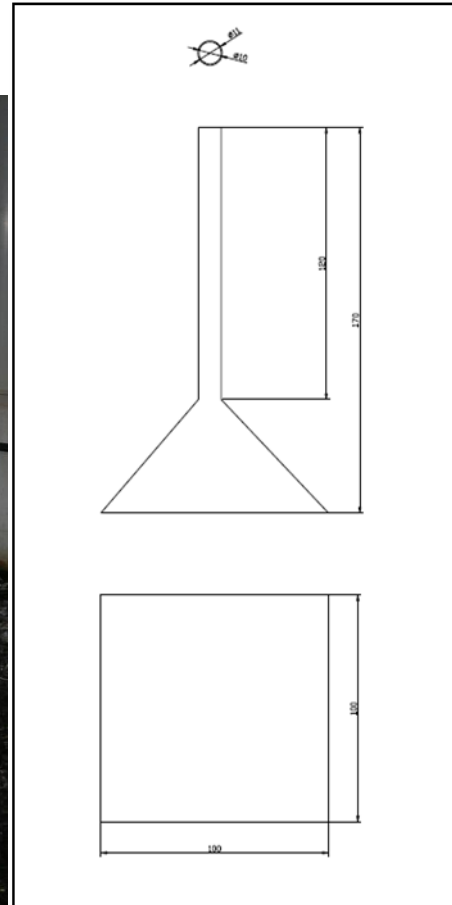
Para la medición de estos parámetros se recurrió a un termo-higrómetro de la casa *Hanna Instruments*, modelo *HI 96340*. Se midió temperatura y humedad de la corriente de aire tratada previamente a su entrada en el biofiltro y tras la salida del mismo.

La toma considerada como anterior a la entrada de la corriente al biofiltro, se realizó en la arqueta de una de las tamizadoras de la sala de tamices.

Para la toma tras el paso de la corriente por el biofiltro se instalaba sobre el material de relleno, una campana fabricada en PVC por la casa comercial Horniplas, S.A., para el muestreo de corrientes de aire de fuentes difusas tal como establece la norma *UNE-EN 13.725* (pág. 69). (ANEXO 5).



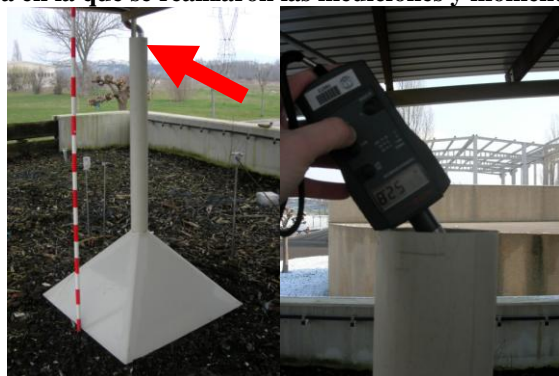
Fotografía nº 13: Termo higrómetro modelo HI 96340 utilizado, (www.hannainst.es)



Fotografía nº 14: Campana empleada para las mediciones y representación esquemática de la misma con sus dimensiones.



Fotografía nº 15: Arqueta en la que se realizaron las mediciones y momento de la medición..



Fotografías nº 16 y nº 17: Punto y momento de la toma de datos a la salida del biofiltro de la temperatura y humedad del gas tratado.

4.3.5.2.- Detección de sustancias inhibidoras de la actividad del biofiltro.

Por la procedencia del gas tratado, y como ya ha sido explicado, es más que posible que puedan aparecer sustancias que, además de provocadoras de olor, sean acidificadoras del medio e inhibitorias de la actividad microbiana del biofiltro.

Se realizaron mediciones de concentraciones de gases de este tipo en los mismos puntos donde se midió la temperatura y humedad del gas tratado: arqueta interior de la sala de tamices, considerándose este punto como anterior a la entrada del aire al sistema de ventilación de la sala; y tras la salida del aire del biofiltro sobre la boca de la campana instalada para realizar las mediciones.

Para la medición de concentración de gases se utilizó un sistema de detección puntual de gases de la casa *Dräger*, consistente en una bomba de fuelle que fuerza el aire a analizar a través de tubos colorimétricos. El modelo utilizado durante el estudio es el modelo *Accuro*.



Fotografía n° 18 y n° 19: Bomba de fuelle de la casa *Dräger* modelo *Accuro* y tubos colorimétricos *Dräger*. (www.draeger.es, elaboración propia).

Los tubos colorimétricos empleados fueron los siguientes:

- Sulfuro de hidrógeno, de rango de medición: (0,2 - 5 ppm.)
- Mercaptano, de rango de medición: (0,1 - 15 ppm.)
- Amoníaco, de rango de medición: (0,25 - 3 ppm.)



Fotografía nº 20 y nº 21: Momento de la medición de la concentración de gases en la salida del biofiltro utilizando la campana y medición a la entrada del biofiltro en la arqueta de la sala de tamices.

4.3.6.- Caracterización del lixiviado del biofiltro.

Dada la importancia que posee en el correcto funcionamiento del biofiltro, el contenido en humedad del material filtrante, es necesario controlar el lixiviado provocado durante el funcionamiento del biofiltro. Tanto su cantidad como sus características.

Para determinar la cantidad de lixiviado emitido por el biofiltro se realizó una curva de caudales. Para su elaboración se tomaron muestras de lixiviado en la arqueta del biofiltro que lo recoge y lo conduce a la cabecera de la Estación Depuradora para ser tratado. Las muestras se recogieron a lo largo de una mañana a intervalos de dos horas, conduciéndose al laboratorio de la planta donde se analizaron.



Fotografía nº 22 y nº 23: Situación de la arqueta de recogida de muestras en el biofiltro y momento de la toma de una de las muestras.

Una vez obtenidos los resultados del análisis realizado en el laboratorio, se llevó a cabo una estimación teórica de la cantidad de sustancias provocadoras de malos olores que eran eliminadas en el lixiviado del biofiltro tras la aplicación de riego en su superficie. Tanto para la frecuencia de riego primera como tras la modificación realizada en el riego.

La estimación se realizó para el ácido sulfhídrico y para el amoníaco de la siguiente forma:

Se calculó la cantidad de azufre, en gramos, que se recogía en el lixiviado del biofiltro a lo largo de un día de la siguiente manera. (Ec.1)

$$\frac{\text{mg } SO_4}{\text{litro de lixiviado}} \times \frac{1 \text{ mg}}{1.000 \text{ g}} \times \frac{\text{litros de lixiviado}}{\text{día}} \times \frac{p.m. (S)}{p.m. (SO_4)}$$

Una vez calculada la cantidad de azufre recogida en el lixiviado a lo largo de un día (Ec.1), se calculó la cantidad de H_2S , en gramos, a la que equivaldría. (Ec.2).

$$\frac{g (S) \text{ lixiviado}}{\text{día}} \times \frac{p.m. (H_2S)}{p.m. (S)}$$

Para poder determinar las ppm que supone la cantidad de azufre recogido en el lixiviado se determinó los kilogramos de aire que eran tratados en el biofiltro a lo largo de un día. (Ec.3). Se emplea la densidad del aire (ρ) en función de la temperatura medida a la entrada del biofiltro.

$$7.000 \frac{m^3}{h} \times 24 \frac{h}{\text{día}} \times \rho \text{ aire entrada}$$

Tabla nº 7: Propiedades del aire en función de su temperatura. (Modificado de Muro et al).

$T[^\circ C]$	$\rho[kg/m^3]$	$\nu[mm^2/s]$	$D_H[mm^2/s]$	$D_e[mm^2/s]$	$D_c[mm^2/s]$	$D_s[mm^2/s]$
0	1.292	13.3	18.9	21.2	12.9	17.7
5	1.269	13.7	19.5	22.0	13.3	18.3
10	1.246	14.2	20.2	22.7	13.8	19.0
15	1.225	14.6	20.8	23.4	14.2	19.6
20	1.204	15.1	21.5	24.2	14.7	20.2
25	1.183	15.5	22.2	24.9	15.1	20.8
30	1.164	16.0	22.8	25.7	15.6	21.5
35	1.146	16.4	23.5	26.4	16.0	22.1
40	1.128	16.9	24.2	27.2	16.5	22.7
45	1.110	17.4	24.9	28.0	17.0	23.4

Finalmente, se obtienen las ppm de H_2S eliminadas en el lixiviado del biofiltro. (Ec.4).

$$\frac{mg\ H_2S/día}{Kg\ aire/día} = ppm\ H_2S$$

El cálculo de la cantidad de amoníaco eliminada en el lixiviado del biofiltro se realizó de manera similar.

4.3.7.- Evaluación de la eficiencia del biofiltro en la eliminación de olores.

El cálculo de la eficiencia de eliminación de olores por cualquiera de los métodos de tratamiento que han sido descritos con anterioridad, se basa en el control de la presencia de sustancias causantes de malos olores previamente a la entrada de la corriente gaseosa al equipo de tratamiento y tras el paso de la corriente por el equipo.

Una vez obtenidas las concentraciones de dichos compuestos la efectividad del método de control se obtiene de la siguiente manera.

- Removal Efficiency - Eficacia de eliminación. (%).

$$RE = \frac{(C_E - C_S)}{C_E} \times 100$$

- Elimination Capacity - Capacidad de eliminación. (ppm/hora)

$$EC = \frac{(C_E - C_S) \times Q}{V}$$

Donde, C_E y C_S son las concentraciones a la entrada y a la salida del biofiltro, respectivamente. V es el volumen del biofiltro y Q es el caudal de aire que circula a través del mismo.

Para el caso objeto de estudio, se ha optado por realizar el cálculo de la efectividad del sistema aprovechando las mediciones realizadas para la detección de las sustancias inhibidoras de la actividad del biofiltro.

4.4.- Propuesta de modificaciones en el funcionamiento del biofiltro.

Tras la obtención de los parámetros anteriormente descritos y teniendo en cuenta las referencias bibliográficas encontradas acerca de los valores óptimos recomendados para dichos parámetros, se propusieron una serie de cambios en el biofiltro con el fin de alcanzar o mantener los valores recomendados.

Los cambios propuestos son de dos tipos: por un lado se proponen cambios de tipo constructivo y por otro lado, cambios en el manejo realizado hasta el momento.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1.- Descripción del biofiltro de ensayo de Arazuri.

5.1.1.- Ubicación del biofiltro en el proceso de depuración de la E.D.A.R. de Arazuri.

El proceso de depuración del agua residual de la Comarca de Pamplona llevado a cabo en la Estación Depuradora de Arazuri está compuesto por dos grandes líneas de procesado diferenciadas. La primera se encarga del tratamiento del agua residual para que ésta pueda ser devuelta al cauce del río Arga cumpliendo los requerimientos necesarios. La segunda línea de actuación, subordinada a la primera, se encarga de procesar los lodos generados en la anterior.

El proceso de tratamiento de lodos persigue la finalidad de la transformación de éstos, considerados como un residuo contaminante, en un producto higienizado e inocuo para el medio ambiente. Este proceso consigue el aprovechamiento de los fangos de depuradora mediante la extracción de energía térmica y eléctrica y la producción de compost.

Aunque el proceso de tratamiento de fangos persigue la finalidad de minimizar el impacto ambiental que los lodos generarían de no realizarse este tratamiento, durante el proceso de tratamiento de lodos se generan distintos perjuicios que han de ser corregidos. El más significativo de estos perjuicios es la producción de corrientes de aire contaminante y oloroso que puede afectar a la calidad del aire y al bienestar de la plantilla de la planta de Arazuri y las poblaciones cercanas.

Para evitar esta situación se ha decidido actuar en varios puntos del proceso de tratamiento de lodos. Se han identificado los focos de emisión de las corrientes olorosas y se ha optado por el establecimiento de medidas correctoras. En primer lugar, construcción de un sistema de extracción y conducción del aire hacia un sistema de tratamiento para los espesadores y edificio de tamices. En segundo lugar, confinamiento

señalan los dos puntos en los que se ha introducido el sistema de biofiltración como método de eliminación de malos olores. (Modificado de www.mcp.es).

5.1.2.- Esquema general de la instalación.

La corriente de aire tratada en el biofiltro de ensayo proviene de los espesadores y de la nave de tamizado que forman parte del proceso de tratamiento de lodos. En la planta de Arazuri hay instalados tres espesadores de los que se extrae el aire para conducirlo hasta la nave de tamices. Cuando dicha corriente es introducida en el edificio de tamices, se une a la propia corriente odorífera generada en el tamizado y junto con ella es conducida hacia el biofiltro que se encuentra en el exterior.

El edificio de tamices consta de dos plantas, situándose en la superior el motor encargado de realizar la extracción. Una vez succionado el aire, éste es introducido en la cámara de humidificación previa, tras lo cual llega al *plenum* del biofiltro donde se distribuye por todo el material filtrante.

El biofiltro emplea, como material filtrante, rechazo obtenido en el cribado del compost producido en la propia planta depuradora. El medio filtrante se encuentra contenido en una estructura de hormigón.

En su superficie, el biofiltro tiene instalado un sistema de riego por aspersión para el lavado del perfil del relleno y de los posibles metabolitos que pudieran aparecer tras su puesta en funcionamiento. Así como para el mantenimiento de la humedad del medio filtrante, necesario para que se lleven a cabo las reacciones de degradación de los contaminantes.

Todos los componentes del biofiltro serán descritos con detalle a continuación.

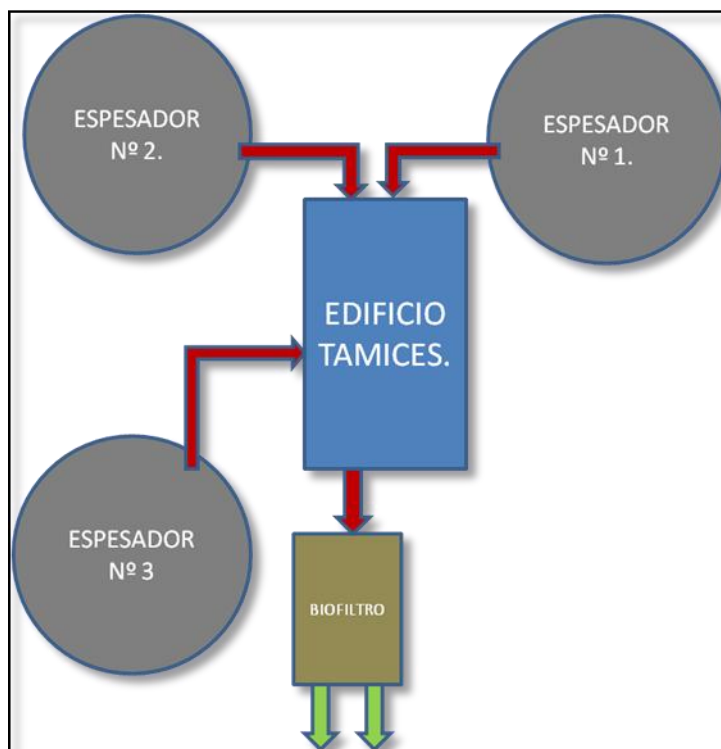
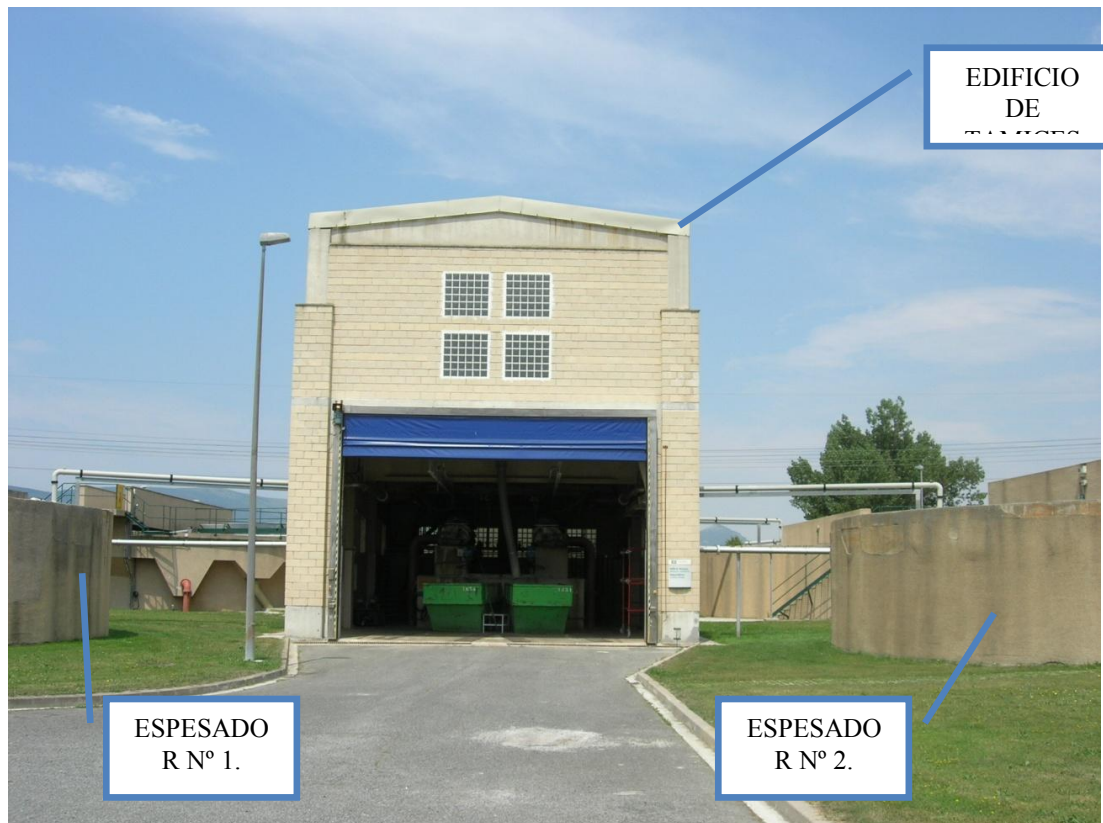


Figura nº 12: Representación esquemática de la instalación. Las corrientes señaladas en rojo representan las corrientes contaminadas y las señaladas en verde representan la emisión a la atmósfera del aire posteriormente a su tratamiento. *(Elaboración propia).*



Fotografía n° 24: Vista frontal del biofiltro. En primer término la rampa de acceso, al fondo el edificio de tamices.



Fotografía nº 25: Vista de la parte trasera del edificio de tamices con los espesadores nº 1 y nº 2.

5.1.3.- Descripción de instalaciones.

5.1.3.1.- Características de la obra civil:

El biofiltro es un recinto rectangular de 7 x 8 metros. Este rectángulo está formado por un muro de hormigón de 1,95 metros de altura y 0,30 metros de anchura.

La base del biofiltro es igualmente de hormigón de 0,30 metros de espesor y con pendiente del 2 % para la conducción de lixiviados hasta la canaleta de desagüe, que a su vez, está conectada con un pozo de registro mediante una tubería de 20 cm de diámetro. La parte inferior de la base del biofiltro descansa sobre una capa granular compactada. La parte superior de la base del biofiltro posee unas tabicas de hormigón dispuestas longitudinalmente y separadas unas de otras 1,6 metros. Sobre estas tabicas se apoyan las losas de hormigón perforadas, conformándose así el *plenum* o cámara de expansión del aire a tratar.

Previamente a su entrada en el material de relleno, el aire es descargado desde el sistema de conducción en una precámara construida en hormigón. En esta precámara hay dispuestas tres duchas en su parte superior que saturan de humedad el aire a tratar.

Uno de los lados del rectángulo que forma la estructura del biofiltro no está construido en hormigón, si no que está formado por traviesas de ferrocarril apiladas, facilitando el vaciado y llenado del biofiltro mediante el uso de pala cargadora. Toda la estructura construida está protegida por una cubierta metálica.



Fotografía n° 26: Vista general del biofiltro.

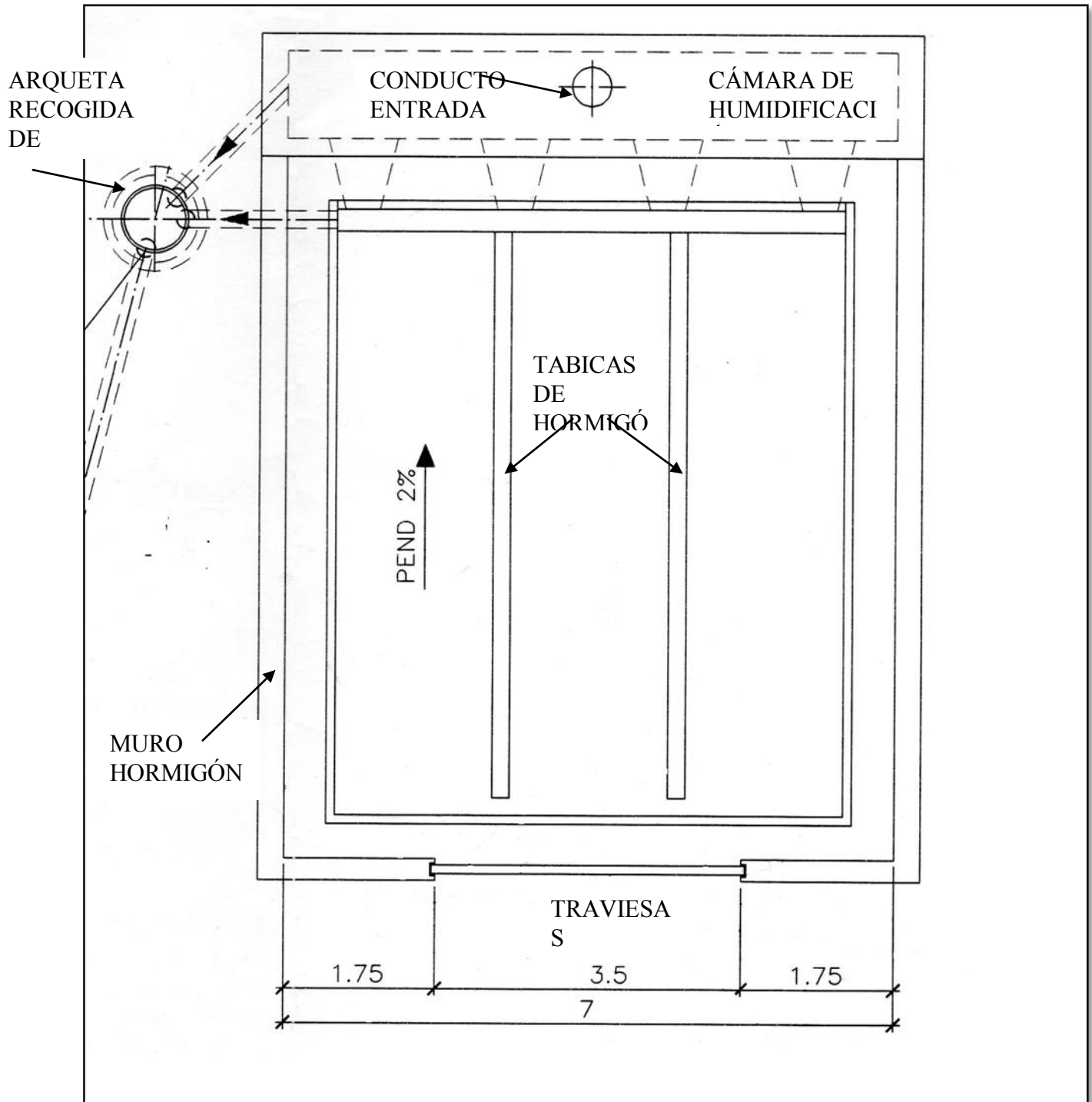


Figura n° 13: Representación de la planta del biofiltro de tamices. (Modificado del Proyecto Biofiltro de Tamices de Cadagua).

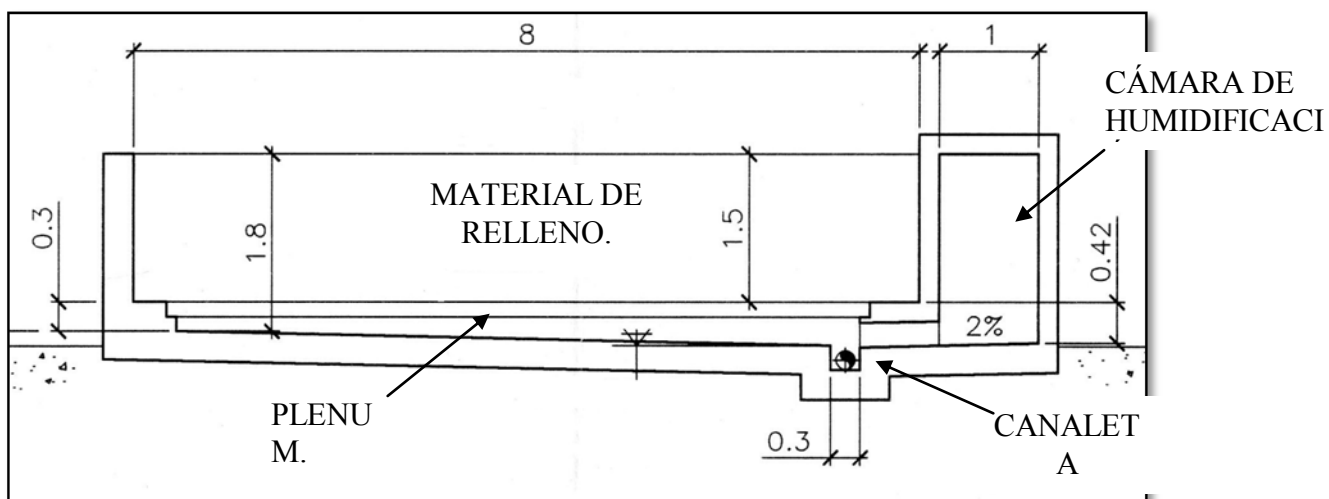


Figura nº 14: Representación del perfil del biofiltro. (Modificado del Proyecto Biofiltro de Tamices de Cadagua).



Fotografía n° 27: Interior de la cámara de humidificación y detalle de las losas perforadas que son colocadas sobre la tabicas para la formación del plenum.

5.1.3.2.- Sistema de extracción.

El sistema de extracción consta de un ventilador de 11 kW y conducciones de extracción y conducción del aire desde la sala de tamices y los espesadores hasta el *plenum* del biofitro. Todas las conducciones instaladas son de polipropileno de sección circular variable en función del caudal.

Desde los espesadores, el aire es extraído a través de una tubería de 140 mm de diámetro que desemboca en la planta baja del edificio de tamices sobre una tubería de 250 mm de diámetro. Este tramo de tubería aumenta su diámetro hasta los 400 mm para ir a parar al ventilador de extracción. En este punto, se le une la conducción para la extracción del aire de la primera planta del edificio. Dicha conducción posee un diámetro variable desde los 280 mm hasta los 450 mm en el punto de unión. Tanto en la planta baja como en la primera, las conducciones de extracción están dotadas de rejillas de aspiración. Tras el ventilador la conducción permanece con un diámetro constante de 450 mm hasta su llegada a la cámara de humidificación.

El ventilador está dimensionado para extraer el caudal requerido, fabricado en material anticorrosivo y ha sido instalado en un habitáculo insonorizado en la planta superior del edificio de tamices.



Fotografía nº 28: Conducción del aire desde los espesadores hasta edificio de tamices (140 mm) y conducción del aire en la planta baja del edificio (250 mm).



Fotografía nº 29: Señalada en la parte superior, conducción de la primera planta del edificio de tamices (280mm), al fondo habitáculo de insonorización del ventilador y señalada en la parte inferior conducción tras el ventilador (450 mm). En la fotografía de la derecha el ventilador instalado para la succión.



Fotografía nº 30: Arriba a la izquierda, conducción desde el edificio de tamices hasta el biofiltro. A la derecha, llegada sobre la parte superior de la cámara de humidificación. Desembocadura en la cámara de humidificación y aberturas de acceso al plenum.

5.1.3.3.- Descripción del sistema de riego.

Para la aportación de la humedad necesaria para el correcto funcionamiento del biofiltro se ha optado por un sistema de riego por aspersión. El sistema de riego está compuesto por cuatro aspersores sectoriales de tipo agrícola dispuestos en las cuatro esquinas del biofiltro. Los aspersores están colocados sobre tubería de polietileno de 40 milímetros de diámetro anclada sobre la pared de hormigón del biofiltro.

Junto al sistema de riego en superficie y como se ha indicado anteriormente, el biofiltro dispone de una precámara de tratamiento del aire antes de su entrada al *plenum*. En esta cámara el aire es humectado mediante duchas consiguiendo su saturación.

Tanto el funcionamiento del sistema de riego, como el equipo de duchas, están controlados por electroválvulas conectadas a un ordenador de servicio de la depuradora.



Fotografía nº 31: Arriba a la izquierda distribución de la tubería de polietileno en la superficie del biofiltro. A la derecha detalle de uno de los aspersores. Abajo a la izquierda cámara de humidificación con duchas. A la derecha electroválvulas de control de ambos circuitos.

5.1.3.4.- Material de relleno empleado.

El material empleado como material filtrante en el biofiltro de tamices es el rechazo obtenido tras la criba del compost elaborado en la propia depuradora. El material es empleado como estructurante de las pilas de compost y tras la conclusión del proceso de compostaje su tamaño resulta excesivo, por lo que es rechazado tras el paso por la cribadora. El cribado empleado ha sido de 12 mm.

El rechazo presenta grandes ventajas a la hora de ser empleado como material filtrante.

- Al estar precompostado, presenta gran estabilidad por lo que su degeneración es más lenta que la sufrida por otros materiales de relleno orgánicos como compost, turba, serrín... presentando una mayor vida útil.
- Está colonizado por microorganismos y contiene nutrientes disponibles para ser empleados como fuente de energía.

La capa inferior del material de relleno del biofiltro no está compuesta por cribado si no que se dispuso una primera capa de 0,25 metros de madera de chopo. La altura total del material filtrante es de 1,25 metros.



Fotografía nº 32: Primera capa de material filtrante compuesta por madera de chopo y fotografía de detalle de dicho material.



Fotografía nº 33: Final del proceso de cribado donde es obtenido el material de rechazo y detalle de la superficie del material de relleno del biofiltro.



MATERIAL CRIBADO (1 METRO).

MADERA DE CHOPO
TRITURADA. (0,25 METROS).

Fotografía nº 34: Perfil del material filtrante del biofiltro de tamices.

5.1.3.5.- Manejo del biofiltro.

Una vez llenado el biofiltro, se inicio la puesta en marcha seleccionándose los siguientes parámetros de funcionamiento.

- **Número de renovaciones:** 3 renovaciones/hora para el edificio de tamices y 4 renovaciones/hora para los espesadores. Por tanto, el sistema de extracción trabaja de forma continua.
- **Frecuencia de riego:** en un primer momento el sistema de humidificación del biofiltro tenía una frecuencia de riego diaria (12:50 horas) con una duración de 10 minutos cada riego. La dosis aportada era de 15,35 l/m².
Posteriormente la frecuencia se aumentó pasando a 4 riegos diarios (9:00, 14:00, 17:00, 00:00 horas), con una duración de 5 minutos cada riego. La dosis aportada por cada uno de estos riegos era de 7,68 l/m².
- La **precámara** de humidificación no estaba en funcionamiento.

5.2.- Dimensionamiento del biofiltro.

El edificio de tamices posee una planta de 180 m^2 y una altura total de 10,5 m dividida, a su vez en dos plantas.

Al volumen de aire proveniente del edificio de tamices, hay que añadir el aire que se succiona de los espesadores. Existen en la planta depuradora tres espesadores con un diámetro unitario de 16 m. Siendo la altura de cada uno de estos espesadores de 0,5 m.

El número de renovaciones determinado para cada uno de esos volúmenes de aire ha sido de 3 renovaciones/hora para el caso del edificio de tamices y de 4 renovaciones/hora en el caso de los espesadores.

Por tanto, el volumen de aire a tratar en el biofiltro y que determina el tamaño del mismo, es el siguiente:

- Edificio de tamices: $(180 \times 10,5) \text{ m}^3 \times 3 \text{ renov./h} = 5.670 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Espesadores: $3 \times [(\pi \times 8^2) \times 0,5] \text{ m}^3 \times 4 \text{ renov./h} = 1.206 \text{ m}^3/\text{h}$.

Es necesario que el biofiltro instalado tenga una capacidad de tratamiento de $7.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Comprobación de los parámetros de diseño empleados en biofiltración.

- *Tiempo de residencia total.* $\tau = \frac{V}{Q} = \frac{70}{6822} = 0,01 \text{ h} \times 3600 \frac{\text{seg}}{\text{h}} = 36 \text{ seg.}$
- *Tiempo de residencia real.* $\tau = \frac{V \times \theta}{Q}$.
- *Carga superficial:* $CS = \frac{Q}{A} = \frac{6822}{56} = 121,8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$
- *Carga volumétrica:* $CV = \frac{Q}{V} = \frac{6822}{70} = 97,5 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ h}$

Donde $V \text{ (m}^3\text{)}$ es el volumen del biofiltro, $Q \text{ (m}^3\text{/seg.)}$ el caudal de aire a tratar, θ la porosidad del lecho filtrante y $A \text{ (m}^2\text{)}$ es el área superficial del biofiltro.

El cálculo de los parámetros de diseño permite conocer si el dimensionamiento del biofiltro se ha realizado de manera correcta. Las conclusiones obtenidas al comparar los resultados del biofiltro de tamices con los valores de referencia son:

- El tiempo de residencia del gas en el lecho filtrante del biofiltro de tamices (**36 seg**), está muy ajustado al valor inferior del intervalo de referencia (30 – 60) segundos. Este tiempo de residencia aún será menor si se tiene en cuenta la porosidad del material filtrante y se obtiene el tiempo de residencia real. Por lo tanto se hace necesario un aumento del volumen del material filtrante para que el tiempo de residencia del gas en el material de relleno sea el adecuado.
- El valor obtenido para la carga superficial (**121,8 m³/m²h**), se encuentra dentro del intervalo teórico, (100 – 150 **m³/m²h**), por tanto la superficie ocupada por el biofiltro no debería ser corregida.
- Por último, el valor calculado para la carga volumétrica ,(**97,5 m³/m³h**), aunque cerca, está fuera del intervalo de referencia de este parámetro (100 – 150 **m³/m³h**).

5.3.- Determinación del régimen de funcionamiento.

5.3.1.- Temperatura del material de relleno.

En la siguiente tabla, se presentan los resultados obtenidos en las mediciones de **temperatura de tipo puntual**. Los datos presentados son la media de todas las mediciones efectuadas para cada uno de los quince cuadrantes en los que fue dividida la superficie del biofiltro. Se presentan los resultados obtenidos para las distintas frecuencias de riego siendo: frecuencia 1, un riego diario de 10 minutos ($15,35 \text{ l/m}^2$) y frecuencia 2, cuatro riegos diarios de 5 minutos de duración cada uno ($7,68 \text{ l/m}^2$).

Tabla nº 8: Resultados medios obtenidos en las mediciones de temperatura efectuadas

	SUPERFICIE		0,75 cm.	
	FREC. 1	FREC. 2	FREC. 1	FREC. 2
1	10,98	13,5	14,04	17,15
2	10,4	13,25	18,5	18,25
3	10,38	13,55	23,6	20,35
4	10,36	13,45	18,96	17,9
5	10,32	13,45	15,42	17,8
6	10,3	13,45	16,32	18,85
7	10,32	13,55	16	16,25
8	10,3	14	14,6	15,95
9	10,3	14	14,56	16,15
10	10	14,05	14,78	19,45
11	10,18	14,05	18,86	18,25
12	10,68	14,4	16,7	16,8
13	10,98	14,4	17,04	18,5
14	11,08	14,4	15,78	17,85
15	11,1	14,5	14,98	18
MEDIA	10,512	13,867	16,676	17,833

Como ha sido comentado en el capítulo de antecedentes, se considera que los microorganismos encargados de la degradación de las sustancias causantes de malos olores son los mismos encargados de la degradación de los residuos urbanos, los procesos de depuración de aguas residuales y los procesos de compostaje. Se trata de microorganismos de tipo mesófilo que se desarrollan dentro de un rango de

temperaturas que va desde los 15 hasta los 41 ° C. Se considera además que, dentro de ese rango, temperaturas que superen los 24 – 25 ° C son las más óptimas para el desarrollo de las reacciones de degradación, al ser las más convenientes para el desarrollo de estos microorganismos.

Para el caso del material de relleno utilizado en el biofiltro de tamices, las temperaturas a las que éste se encontraba no eran las más adecuadas para el desarrollo de la actividad de degradación de los contaminantes. El material presentaba en superficie una temperatura media de 10,5 ° C y de 16,7 ° C a una profundidad de 75 centímetros. Estos resultados indican cierta actividad en el biofiltro aunque ralentizada por las bajas temperaturas.

Tras el cambio de la frecuencia de riego la temperatura media del material de relleno aumentó hasta los 13,9 ° C de media en superficie y hasta los 17,8 ° C en profundidad. Este aumento de temperatura indica el aumento de actividad microbiana en el biofiltro debido al aumento de humedad del material de relleno tras el cambio de la frecuencia de riego acercándose hacia los niveles requeridos.

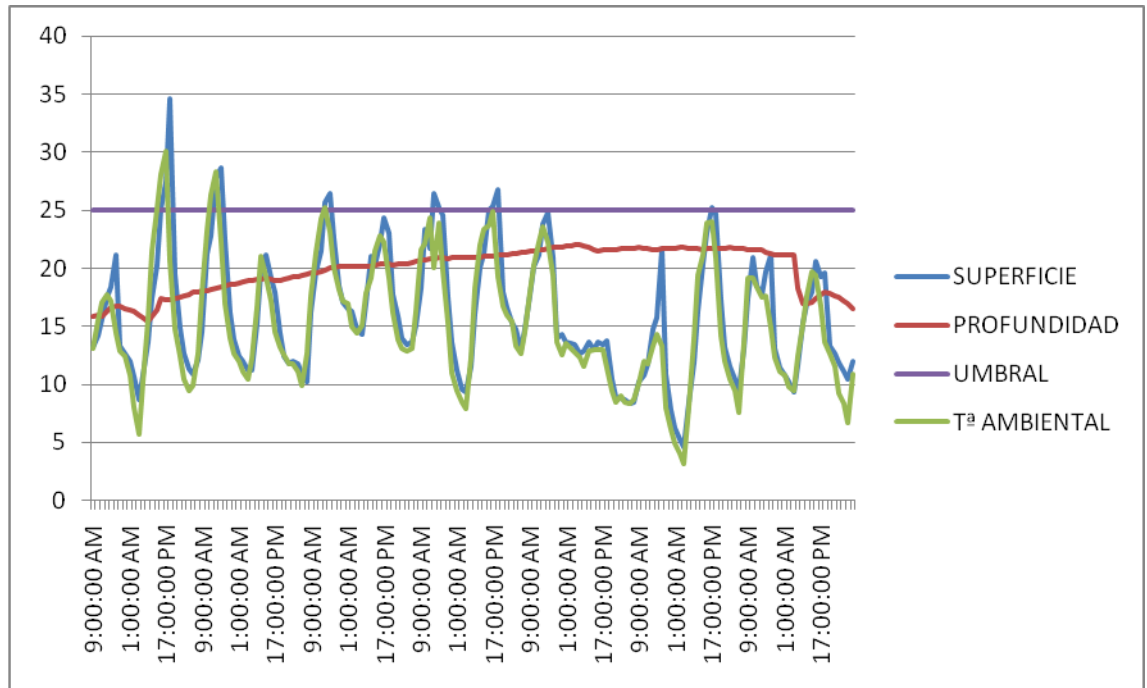
Este hecho confirma que el contenido en humedad del material de relleno no era el adecuado, ya que tras el cambio de frecuencia de riego, la actividad microbiana aumentó provocando a su vez un aumento de la temperatura del medio de relleno. Las reacciones llevadas a cabo en los materiales de relleno de los biofiltros no dejan de ser reacciones exotérmicas.

Los resultados obtenidos en la medición de la **temperatura de forma continua** del material de relleno se presentan en la siguiente tabla. Datos medios en °C.

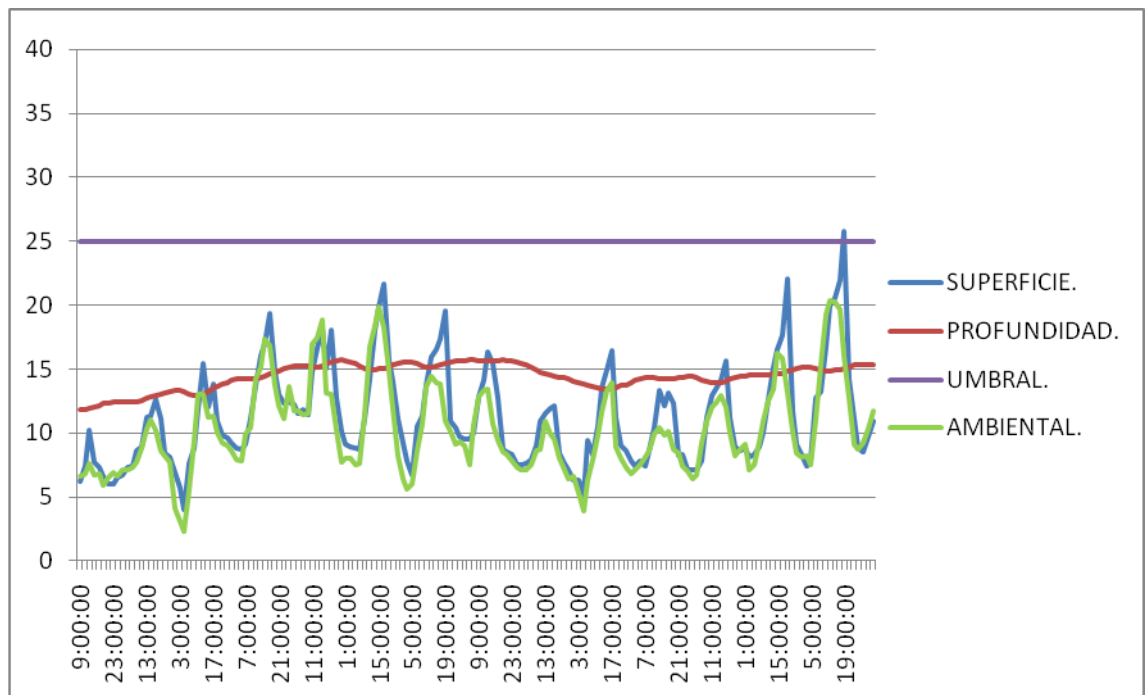
Tabla nº 9: Media de los valores obtenidos por la sonda de temperatura de tipo continuo.

FRECUENCIA DE RIEGO	SUPERFICIE.		PROFUNDIDAD.		Tª AMBIENTAL. (tª media.)
	tª media.	σ	tª media.	σ	
1	16,05	5,37	19,9	1,88	15,25
2	12,79	3,90	15,41	0,99	10,20

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos con la sonda de temperatura de tipo continuo. La primera es la correspondiente a los resultados obtenidos durante la primera frecuencia de riego, siendo la segunda gráfica la correspondiente a la segunda frecuencia de riego.



Gráfica nº 1: Temperaturas en continuo (superficie y 0,75 cm.), para frecuencia de riego 1.



Gráfica nº 2: Temperaturas en continuo (superficie y 0,75 cm.), para frecuencia de riego 2.

Ambas gráficas representan los resultados obtenidos en mediciones efectuadas en el mismo período del año y para un periodo de tiempo con una duración similar. La temperatura ambiental corresponde, igualmente, para la misma época del año.

Al igual que para el caso de las temperaturas puntuales del material de relleno, en este caso nuevamente puede observarse como la temperatura del material de relleno se sitúa por debajo del nivel requerido para un funcionamiento adecuado del biofiltro.

En ambas gráficas puede observarse como la temperatura superficial del material de relleno está influenciada de manera directa por la temperatura ambiental. Las diferencias entre la temperatura en superficie y la ambiental se observan únicamente tras la realización de cada uno de los riegos efectuados, cuando la temperatura en superficie alcanza sus valores máximos. Como conclusión a todo lo anterior puede extraerse la falta de representatividad que tiene la temperatura de la superficie del relleno con la temperatura interior.

Para el caso de la temperatura del material filtrante a una profundidad de 75 centímetros, y al contrario de lo que cabría esperar tras la obtención de las temperaturas de tipo puntual a la misma profundidad, en las gráficas queda reflejada una disminución de su nivel tras la modificación del riego. La diferencia media de temperaturas en profundidad tras el cambio de frecuencia de riego es de 4,5 ° C. Si bien, este descenso es importante hay que señalar que las variaciones térmicas a lo largo del periodo de medición fueron muchos menores para la frecuencia de riego número 2 presentando una desviación típica de 0,99 frente a la desviación de la frecuencia de riego 1: 1,88.

Debe señalarse que durante el periodo de medición de las temperaturas de tipo continuo para la segunda frecuencia de riego, la temperatura ambiental media descendió 5° C, lo cual pudo influir en la temperatura media que alcanzó el material de relleno y explicar en parte, el descenso térmico producido tras la modificación del riego.

El riego en varios momentos del día facilita el mantenimiento más o menos constante de la temperatura del material de relleno. Aunque el aumento de la frecuencia de riego parece favorecer este aspecto, debería incrementarse el caudal en cada uno de los riegos consiguiéndose los dos efectos deseados: aumento de la temperatura del material de relleno y mantenimiento constante de la misma.

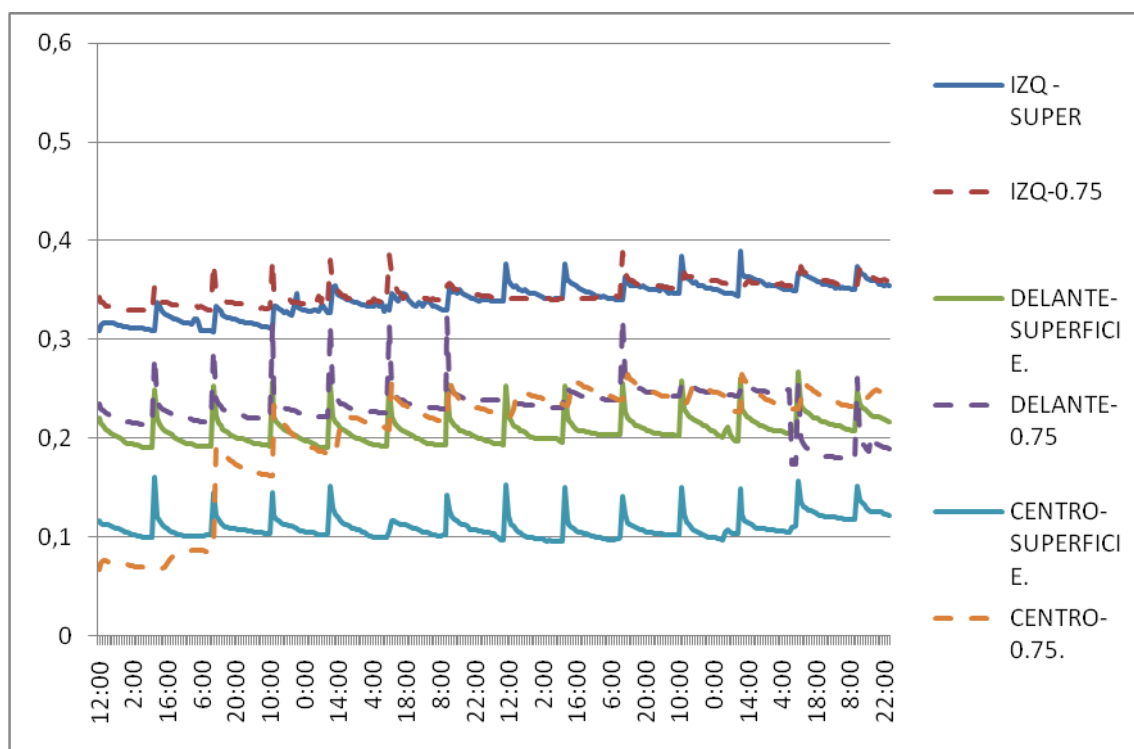
5.3.2.-Humedad del material de relleno.

En la siguiente tabla se presentan los datos de humedad media del material de relleno obtenidos con las sondas de humedad instaladas. Nuevamente, se trata de datos medios para las distintas frecuencias de riego y para las dos profundidades a las que han sido tomados todos los parámetros: superficie del material de relleno y 0,75 centímetros de profundidad. El tipo de humedad obtenido es la humedad volumétrica (m^3/m^3).

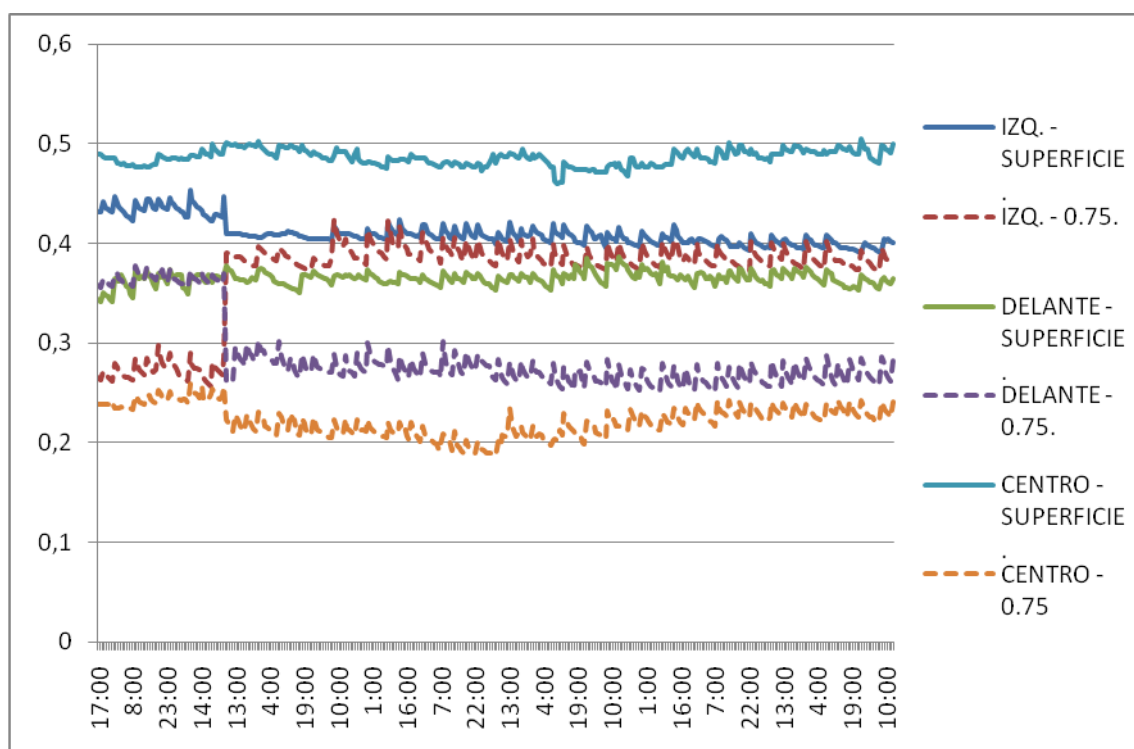
Tabla n° 10: Datos medios de los valores obtenidos por las sondas de humedad instaladas.

FRECUENCIA DE RIEGO	SUPERFICIE.		PROFUNDIDAD.	
	$H_V (\text{m}^3/\text{m}^3)$.	σ	$H_V (\text{m}^3/\text{m}^3)$.	σ
1	0,219	0,012	0,261	0,024
2	0,420	0,005	0,292	0,007

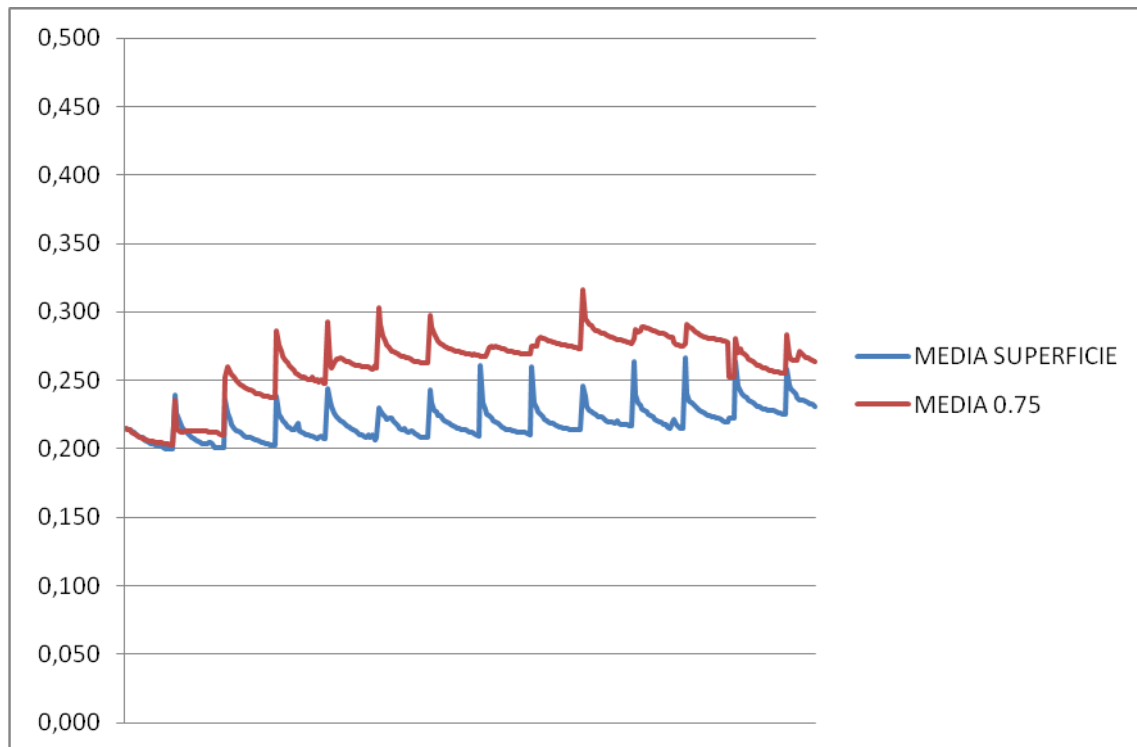
Se presenta a continuación la representación gráfica de los valores obtenidos por las sondas. Los intervalos de tiempo a los que pertenecen los valores representados son los mismos para las dos frecuencias de riego. En la primera de las gráficas, (gráfica n° 3), está representado el contenido de humedad del material de relleno para cada una de las sondas colocadas con el primer tipo de riego, la segunda gráfica, (gráfica n° 4), representa el cambio tras la modificación del riego. Las gráficas n° 5 y n° 6 representan el contenido medio de humedad de todo el material de relleno del biofiltro para las distintas frecuencias de riego.



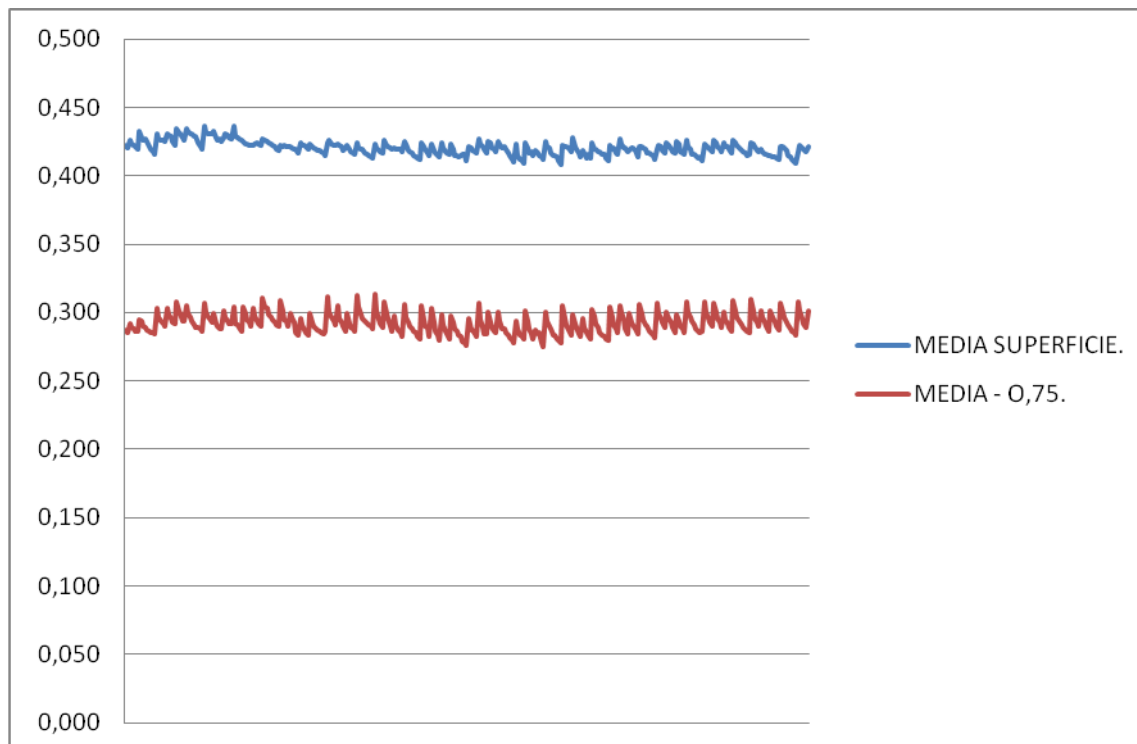
Gráfica nº 3: Valores de humedad en las sondas instaladas para frecuencia de riego 1.



Gráfica nº 4: Valores de humedad en las sondas instaladas para frecuencia de riego 2.



Gráfica nº 5: Valores de humedad medios para frecuencia de riego 1.



Gráfica nº 6: Valores de humedad medios para frecuencia de riego 2.

El contenido en humedad del material filtrante del biofiltro de tamices no alcanza los niveles óptimos requeridos para el desarrollo de la comunidad microbiana (40 – 60 %) y la aparición de las reacciones de degradación de los contaminantes contenidos en el gas.

La modificación del riego ha incrementado el contenido en humedad del material de relleno y ha conseguido además, que el nivel alcanzado tras la modificación se mantenga de manera más estable. (La frecuencia de riego 2 presenta una desviación típica de 0,007 frente a la desviación típica de la frecuencia 1: 0,024).

Por tanto el aumento de la frecuencia de riego favorece el mantenimiento estable de la humedad del material, aunque se hace necesario un aumento en el caudal aportado. La puesta en marcha de la cámara de humidificación puede contribuir al aumento del contenido en humedad del material filtrante, alcanzando los niveles más favorables para que se lleven a cabo las reacciones de degradación de los compuestos olorosos.

Otro aspecto a señalar es la posible aparición de caminos preferenciales durante el desarrollo de la toma de datos. En la gráfica nº 3 puede observarse como la humedad se distribuye de manera uniforme en las distintas sondas instaladas. Un aumento o disminución del contenido en superficie va acompañado del mismo efecto en la sonda correspondiente colocada a 0,75 centímetros. Mientras que, tras la modificación efectuada en el sistema de riego, este comportamiento sólo se mantiene en la sonda instalada a la izquierda.

Este hecho podría explicar además los resultados obtenidos por la sonda de temperatura de tipo continuo instalada en el mismo punto que la sonda de humedad denominada “centro”. El nivel de humedad en este punto es inferior tras la modificación del riego llevado a cabo.

5.3.3.- pH del material de relleno.

Los resultados del análisis de las muestras de relleno del biofiltro de tamices por parte del laboratorio de la planta depuradora se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla nº 11: Resultados obtenidos en el análisis de pH del perfil del material de relleno.

<i>Nº de muestra.</i>	<i>Profundidad.</i>	<i>pH</i>
1	20 cm.	7,45
2	40 cm.	7,7
3	60 cm.	7,6
4	80 cm.	7,62
5	100 cm.	7,45

El nivel de pH del material de relleno está dentro de los niveles fijados como recomendables en biofiltración pH (6 – 8), e incluso se acercan más hacia niveles básicos que ácidos, resultado éste quizás más esperable conociéndose la procedencia del gas tratado. En este aspecto, el material de cribado que ha sido empleado como material de relleno del biofiltro, parece poseer una buena capacidad tampón.

5.3.4.- Altura del material de relleno.

La altura media inicial alcanzada por el material de relleno era de 1,25 metros. Al finalizar el ensayo y vaciar el biofiltro, la altura media del material de relleno era de 1,14 metros.

La pérdida de altura ha sido de 11 cm, lo que representa una disminución del 9 % de la altura del perfil.

Esta pérdida en altura es debida, (además de por los fenómenos naturales de fermentación y degradación del material orgánico), a la presencia en el gas tratado de compuestos degradantes del material filtrante que reducen la granulometría del material y la porosidad del lecho, provocándose fenómenos de compactación.

Como ha sido señalado en los antecedentes, la compactación del relleno del biofiltro conlleva la aparición de caminos preferenciales para el gas y el aumento del esfuerzo que tiene que realizar el equipo de extracción. Lo que provoca un aumento en el gasto energético, y por tanto, un aumento en los gastos de mantenimiento del biofiltro.

Se origina una distribución inadecuada de la humedad dentro del material de relleno y disminuye la porosidad del lecho filtrante aumentándose el tiempo de residencia del gas tratado dentro del material.

El aumento del tiempo de residencia dentro del material de relleno puede dar lugar a la acumulación de metabolitos procedentes de las reacciones de oxidación que su vez pueden provocar daños en la estructura del material de relleno.

Como complementación a las mediciones de la altura del material y para determinar la aparición de caminos preferenciales, se realizó una segunda prueba en la que se introdujo humo frío en el sistema de extracción.



Fotografía n° 35: Momento de la realización de la prueba de inyección de humo frío en el material de relleno.

La inyección de humo en el sistema de extracción del edificio de tamices permitió comprobar que la distribución del aire a tratar por el material de relleno no era uniforme habiéndose formado caminos preferenciales. En la fotografía de la izquierda puede observarse como el humo es emitido de forma más uniforme en el perfil derecho del material y en la parte posterior del biofiltro.

La fotografía de la derecha muestra con detalle la emisión del humo frío en el perfil izquierdo del material, donde se observa como el humo surge por la parte más cercana a la cámara de humidificación.

En ambas fotografías se observan como mucho de los orificios de las losas perforadas que forman el *plenum* del biofiltro, permanecen taponados como consecuencia de la corrosión provocada por el gas tratado.

5.3.5.- Caracterización del gas tratado.

5.3.5.1.- Temperatura y humedad.

En la siguiente tabla se presentan los valores de temperatura y humedad obtenidos para la corriente de gas tratada. Previamente a la entrada de dicha corriente en el material filtrante y tras la salida del material.

Tabla nº 12: Temperatura y humedad del gas tratado a la entrada y a la salida del biofiltro.

	Temperatura (°C).	Humedad (%).	g/m ³
Entrada biofiltro.	6,4	91,4	7
Salida biofiltro.	2,2	61,8	3

En el momento de la toma de datos presentados la temperatura del material filtrante del biofiltro era de 8,5 ° C.

Los valores de temperatura y humedad obtenidos en las mediciones efectuadas no son adecuados para el correcto funcionamiento del biofiltro. Para el caso de la temperatura, su situación sería calificada como crítica según varios autores que fijan el nivel óptimo de temperatura del gas a tratar entre los 20 y 37 ° C, (no debiendo estar nunca fuera del intervalo 10 - 40 ° C), y el de humedad en valores mayores del 99 % para la corriente gaseosa a tratar. (*Pagans, 2.007, Saña 2.010*)

Los valores de temperatura obtenidos indican que la corriente de aire que atraviesa el biofiltro está provocando un calentamiento del material de relleno y un aumento de su humedad relativa, lo cual es beneficioso para el desarrollo de las reacciones de

degradación de los contaminantes por parte de la comunidad microbiana. Recurriendo al diagrama psicométrico se cuantifica en 4 g/m^3 la cantidad de agua que la corriente está aportando al material de relleno.

Sin embargo, estos valores deberían ser distintos. Los valores, tanto de temperatura como de humedad, a la entrada del biofiltro son inferiores a los valores adecuados. La temperatura debería ser superior y la humedad tendría que estar cerca de los valores de saturación. Ambos incrementos podrían conseguirse mediante la puesta en marcha de la precámara de humidificación del gas.

5.3.5.2.- Detección de sustancias inhibidoras de la actividad del biofiltro.

Como ha sido comentado en el capítulo de antecedentes, la presencia de determinados compuestos en la corriente de gas tratada por el biofiltro puede acarrear la aparición de problemas de ralentización de la actividad del biofiltro, e incluso paralizar totalmente su actividad si estas sustancias superan una concentración límite.

Los resultados obtenidos para las distintas mediciones efectuadas en el biofiltro de la sala de tamizado fueron las siguientes:

Tabla n°13: Muestreo de presencia de sustancias inhibidoras de la actividad del biofiltro.

H₂S		NH₃		Mercaptano	
Entrada (ppm)	Salida(ppm)	Entrada(ppm)	Salida (ppm)	Entrada (ppm)	Salida (ppm)
1,7	0*	0*	0*	0*	0,5
5	0*	0,5	0*	0*	0,3
0*	0*	0*	0*	-	-
5	0*	0*	0*	-	-
0*	0*	0*	0*	-	-

Los puntos señalados con 0* señalan que la concentración de gases en ese punto era inferior al nivel de sensibilidad del aparato empleado en las mediciones.

Los resultados obtenidos en las mediciones efectuadas muestran la presencia de concentraciones consideradas como bajas de ácido sulfhídrico, amoníaco y mercaptano. Las concentraciones detectadas no deben suponer problemas para el correcto desarrollo

de la actividad del biofiltro. Se fijan concentraciones inhibitoras de la actividad a partir de 40 ppm para el amoníaco, (Saña, 2.010). En el caso del sulfhídrico, la inhibición de la actividad microbiana está relacionada con la transformación del ácido a SO_2 , fijándose la inhibición total del biofiltro a concentraciones de 100 ppm. (Etchatren, 2.005).

Para el caso del biofiltro de tamices, la saturación de la corriente en la cámara de humidificación debería ser suficiente para el control de la posible presencia de este tipo de sustancias. Parte de estos compuestos serían arrastrados hacia el lixiviado de la propia cámara y posteriormente eliminados en el proceso de depuración de agua de la planta. Las partículas de sulfhídrico y amoníaco que consigan penetrar en el material de relleno pueden ser degradadas por el propio biofiltro, siempre que sus concentraciones no sean muy elevadas y la corriente entre saturada de humedad. (Devinny et al, 1.999, Etcharen, 2.005).

Por otro lado, se ha de incrementar la frecuencia de riego en superficie del biofiltro para el lavado del perfil del material de relleno y el arrastre de los metabolitos generados en las reacciones de degradación de estos compuestos hacia el lixiviado del biofiltro.



Fotografía n° 36: Corrosión aparecida en la cubierta metálica del biofiltro.

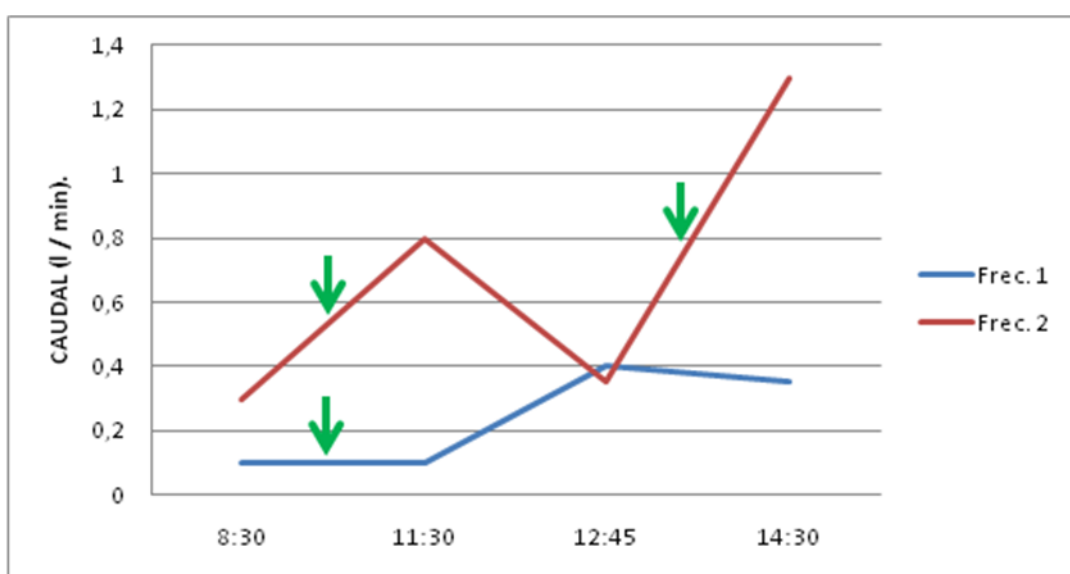
Si bien, y como se ha señalado anteriormente, no se detectaron concentraciones de ácido sulfhídrico y amoníaco de importancia, sí eran fácilmente apreciables olores y síntomas de degradación de estructuras, presumiblemente generados por la presencia de sulfhídrico. Lo cual indica que las emisiones, aunque continuas en el tiempo, no eran de un valor constante y en algunos momentos alcanzaban valores importantes.

Determinar el foco origen de los olores en una E.D.A.R. es difícil y tal y como ha quedado demostrado en la prueba realizada con humo frío para la comprobación de la aparición de caminos preferenciales, los lugares en los que se situaba la campana sobre el material de relleno puede que no fueran representativos de los lugares del material de relleno con mayores niveles de emisión.

5.3.6.- Caracterización del lixiviado del biofiltro.

Las curvas de caudales obtenidas para las distintas frecuencias de riego se representan a continuación. En verde aparecen señalados los momentos en los que tuvo lugar un riego durante la recogida de muestras.

Una vez conducidas a laboratorio, se determinó que el pH de la totalidad de las muestras era inferior a pH 2, nivel mínimo de detección del método empleado en el análisis.



Gráfica nº 7: Representación de las curvas de caudales para las dos frecuencias de riego.

La cantidad de lixiviado procedente del biofiltro de tamices, tanto para la primera frecuencia de riego como para la segunda, es asumible por parte del proceso de depuración de agua llevado a cabo en Arazuri (*1.200 litros/segundo*). Por tanto, el lixiviado podría ser conducido directamente a la cabecera de la planta para ser tratado.

Ha de tenerse en cuenta que la cámara de humidificación del gas a tratar no se encontraba en funcionamiento cuando fue realizado el ensayo. Si dicha cámara entra en funcionamiento sería necesaria una nueva medición del caudal de lixiviado, aunque presumiblemente, el nuevo caudal de lixiviado podría ser tratado de la misma manera.

Estimación teórica de la cantidad de compuestos olorosos eliminados en el lixiviado.

Los resultados obtenidos en la estimación de la cantidad de ácido sulfhídrico y amoníaco que eran eliminados a través del lixiviado del biofiltro se presentan en la siguiente tabla. Se incluyen los resultados para las dos frecuencias de riego empleadas:

Tabla nº 14: Cantidad de ácido sulfhídrico y amoníaco eliminados en el lixiviado del biofiltro.

Frecuencia.	H₂S (ppm).	NH₃ (ppm)
1	1,62	0,34
2	17,2	0.42

El incremento en la frecuencia de riego ha provocado un aumento considerable de la cantidad de ácido sulfhídrico lixiviado, mientras que en el caso del amoníaco el aumento tras la modificación de la frecuencia de riego es mínimo.

El efecto generado para el caso del ácido sulfhídrico tras la modificación de la frecuencia de riego indica que el funcionamiento del biofiltro de tamices es semejante al de una torre de lavado de gases. Deberían adoptarse medidas que eviten la acumulación de sulfhídrico en el material de relleno del biofiltro, ya que es más que posible que su presencia haya ralentizado la actividad biológica de los microorganismos encargados de la degradación de las partículas olorosas, además de haber generado corrosión y degradación de las estructuras que forman el biofiltro. Nuevamente, la conclusión que puede ser extraída es la necesidad de la puesta en marcha de la cámara de humidificación del biofiltro para que el lavado tenga lugar en su interior y no en el material de relleno del biofiltro.

El escaso aumento de la cantidad de amoníaco lixiviada en el biofiltro puede ser debida a la transformación, dentro del material de relleno del biofiltro, del amoníaco a ion amonio (NH₄⁺). Los niveles de pH del agua contenida en el biofiltro, (siempre menores que 2), hacen que el nitrógeno contenido en el material de relleno se encuentre en forma de amonio y dada la baja movilidad y la alta capacidad de retención de este ion por parte de los suelos de tipo orgánico, esté siendo retenido en el material filtrante del biofiltro.

5.3.7.- Evaluación de la eficiencia del biofiltro en la eliminación de olores.

- Removal Efficiency - Eficacia de eliminación.

$$RE = \frac{(C_E - C_S)}{C_E} \times 100$$

- Elimination Capacity - Capacidad de eliminación.

$$EC = \frac{(C_E - C_S) \times Q}{V}$$

Donde, C_E y C_S son las concentraciones a la entrada y a la salida del biofiltro, respectivamente. V es el volumen del biofiltro y Q es el caudal de aire que circula a través del mismo.

El cálculo de la eficiencia del biofiltro para cualquiera de los gases medidos carece de sentido debido a la sensibilidad de la instrumentación empleada, que no detectaba concentraciones inferiores a 0,25 ppm.

De realizarse el cálculo, éste otorgaría una eficacia del 100 % al biofiltro, lo cual es dudoso por la continua detección de olores y los síntomas de descomposición del metal.

Tras el levantamiento del relleno del biofiltro, se comprobó que el funcionamiento del biofiltro no había sido correcto. Las losas que forman el *plenum* se encontraron completamente degradadas por el sulfhídrico presentando gran cantidad de poros obstruidos.

5.4.- Propuesta de modificaciones en el funcionamiento del biofiltro.

Modificaciones en la instalación.

1. El tipo de material empleado en la construcción de la estructura del biofiltro presenta varios inconvenientes.

Al provenir el gas a tratar del proceso de depuración de aguas residuales, la presencia en él de gases acidificantes del medio de relleno o componentes que puedan generar gases corrosivos que afecten a la estructura construida es muy probable. Aunque se debe evitar la entrada de este tipo de compuestos al biofiltro mediante la adopción de una serie de medidas, la construcción de la estructura del biofiltro en materiales resistentes hubiese garantizado una mayor vida útil de la instalación.

La estructura de hormigón construida presenta otro segundo inconveniente. Si durante el uso del biofiltro se decide aumentar el número de renovaciones por hora o ampliar las instalaciones del edificio de tamices se deberá acometer una ampliación del biofiltro lo que requerirá de obra y por tanto de una parada prolongada en el funcionamiento del biofiltro.

Al no ser el caudal de aire tratado excesivamente alto, se podría haber optado por la instalación de biofiltros fabricados en módulos resistentes a la corrosión que presentan la ventaja de ser fácilmente ampliables.

La estructura de hormigón que contiene al material filtrante debería ser protegida de la corrosión mediante la instalación de materiales plásticos. De igual manera las losas de hormigón perforadas podrían ser sustituidas por losas plásticas.



Fotografía nº 37: A la izquierda, estado inicial de las losas perforadas que forman el *plenum*. A la derecha, estado en el que se encontraban al ser vaciado el biofiltro.



Fotografía nº 38: Ejemplo de biofiltro en el que las paredes han sido recubiertas para evitar posibles corrosiones y la solera está construida con losas plásticas. (www.weidneriberica.com).

2. Equipo de ventilación y extracción de aire.

Presenta varias deficiencias que han de ser corregidas.

El edificio de tamices no permanece cerrado en ningún momento por lo que una gran parte de la corriente de aire a tratar se emite directamente a la atmósfera sin ser previamente tratada. Las puertas de esta instalación deberían permanecer continuamente cerradas.

Otro de los puntos a corregir son las trampillas de aspiración del aire ambiente del edificio ya que permanecen cerradas.



Fotografía n° 39: Puertas de acceso al edificio de tamizado de la planta depuradora y ejemplo de trampilla de aspiración cerrada.

Dentro de este edificio, los puntos de mayor emisión de olores deberían estar provistos de campanas extractoras individuales conectadas con el circuito de extracción. Si bien, las tamizadoras tienen instaladas campanas, éstas son de pequeño tamaño y deberían ser reemplazadas.





Fotografía nº 40: Página anterior, puntos de la sala de tamices sin campana localizada. Arriba, campanas instaladas en las tamizadoras. (*Elaboración propia*). Ejemplo de campana localizada de una tolva. (*Saña 2.010*).

Por último, ha de tenerse en cuenta que el caudal de aire a tratar es de, exactamente, $6.822 \text{ m}^3/\text{hora}$ para el número de renovaciones de aire por hora establecido. Un aumento del número de renovaciones efectuadas o una ampliación de las instalaciones conllevaría la necesidad del cambio del ventilador, que está diseñado para un caudal de $7.000 \text{ m}^3/\text{hora}$.

3. Sistema de riego.

El sistema de riego empleado para la humidificación del relleno del biofiltro, presenta una serie de problemas que, para el mejor funcionamiento del biofiltro, deberían ser subsanados.

El sistema de riego está constituido por un único sector de riego formado por dos ramales. El cierre del circuito y la conversión de los dos ramales de riego en uno aumentarían la efectividad del sistema de riego.

Por la superficie a regar, (56 m^2), lo recomendable es la conversión del equipo de riego formado por 4 aspersores por un equipo de riego formado por difusores. Este cambio conllevaría un reparto del agua más homogéneo y de forma más difuminada, evitándose la compactación provocada por el impacto de gota de los aspersores y la pérdida de agua por el exceso de radio de riego y la sobrepresión.

Sería recomendable la instalación de una reductora de presión (la actual es de 6 bares), la sustitución de la tubería porta-aspersores actual (40 mm), por una de menor radio (25 mm) y la instalación de un equipo de fertirrigación para posibles incorporaciones al agua de riego de nutrientes, fungicidas, correctores del pH...

Tras la puesta en marcha de la cámara de humidificación del biofiltro hasta alcanzar la saturación del gas a tratar se debe realizar un nuevo cálculo de la dosis de riego a aplicar en superficie. En el capítulo de anexos del trabajo se describe un método de cálculo de dosis de riego para biofiltros para tratamiento de corrientes saturadas. (ANEXO 4).



Fotografía n° 41: Ejemplo de fallo en el sistema de riego del biofiltro.

4. Equipo para la eliminación de sustancias inhibidoras.

Como ha sido ya señalado en el capítulo de antecedentes, existen una serie de compuestos mal olientes, que al introducirse en los biofiltros son transformados en ácidos que inhiben la actividad microbiana e incluso ocasionan daños en las instalaciones, pudiendo llegar a paralizar el biofiltro.

Aunque existen métodos mediante los cuales se habilita los biofiltros para degradar estos compuestos, la conversión requiere modificaciones en los materiales de relleno y la inoculación del material con microorganismos capaces de trabajar a pH iguales a 1. Esta conversión del biofiltro conllevaría un

encarecimiento de su puesta en marcha y un aumento en la dificultad de su manejo.

Las concentraciones detectadas de gases inhibidores de la actividad del biofiltro de tamices son, en principio, bajas (varios autores fijan concentraciones inhibidoras a partir de 40 ppm). Por tanto, puede ser suficiente para el abatimiento de estas sustancias la puesta en marcha de la cámara de humidificación. Mediante la humectación del gas se conseguiría arrastrar hacia el lixiviado de la cámara una gran parte del ácido sulfídrico y el amoníaco presentes en la corriente a tratar, que más tarde serían eliminados en el proceso de depuración de agua.

La parte de estos compuestos que no sea arrastrada al lixiviado y entre en el material de relleno, podrá llegar a ser degradada por los microorganismos presentes siempre que se sature la corriente de aire entrante ya que, para concentraciones bajas de estos compuestos, los biofiltros de este tipo presentan gran eficacia. (*Etcharen, 2.005*). A todo esto hay que añadir que tras el cálculo de la nueva dosis y frecuencia de riego, está arrastrará hacia el lixiviado del biofiltro parte de estos compuestos, actuando de la misma manera que la cámara de humidificación.

Es de esperar que mediante la adopción de estas medidas el funcionamiento del biofiltro de tamices sea correcto. De no ser así, la solución adoptada en otras instalaciones de este tipo es la instalación, previa a la entrada del aire en el material, de columnas de lavado para el amoníaco y el sulfídrico. De tener que adoptar esta solución la inversión requerida pondría en cuestión si la adopción del sistema de eliminación de olores ha sido la adecuada.

Aunque no para el biofiltro de tamices, en los biofiltros de la nueva nave de compostaje la instalación de las columnas de lavado se debe tener en cuenta por las altas concentraciones de amoníaco que tendrán lugar en los primeros días del proceso de fermentación.



Fotografía n° 42: Ejemplo de la solución adoptada en la depuradora de Manresa para el tratamiento del aire. Disposición de columnas de lavado para gases previas a la introducción del aire en el biofiltro. (Pagans, 2007).

5. Modificaciones para el control de la corriente de aire tratada.

Sería recomendable, previamente a la puesta en marcha del biofiltro, realizar modificaciones en varios puntos del biofiltro que permitan realizar mediciones de diversos parámetros de funcionamiento del mismo sustituyendo a los actuales puntos de medición.

Punto 1: control de la pérdida de carga de la corriente de aire tratada. Este parámetro determinaría el grado de compactación del material filtrante y la sustitución del material de relleno al alcanzar los valores límite, ($> 1.000 \text{ Pa}$). (Pagans, 2.007, Saña 2.010, Etcharen 2.005).



Fotografía n° 43: Punto 1 propuesto tras el paso de la corriente por el ventilador, donde existe la posibilidad de la instalación de un manómetro.

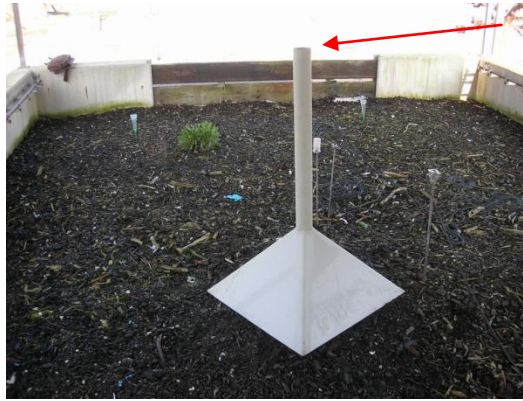
Punto 2: punto previo a la entrada del gas en la cámara de humidificación donde deben realizarse mediciones de la temperatura, humedad y concentración de sustancias inhibidoras en la corriente de aire a tratar. La obtención de estos parámetros en este punto permitiría hacer una aproximación del caudal que debe ser aportado por la cámara de humidificación y comprobar tras la toma de datos en el punto 3 su correcto funcionamiento.



Fotografía n° 44: Ubicación propuesta para el punto 2, previamente a la entrada de la corriente en la cámara de humidificación.

Punto 3: *plenum* del biofiltro. En este punto se deberían recoger los valores de temperatura y humedad de la corriente así como, la concentración de las sustancias inhibidoras. Una vez sean obtenidos estos valores se podrá determinar la efectividad de la cámara de humidificación tanto en la saturación de la corriente como en el abatimiento de sustancias inhibidoras. La temperatura de la corriente de gas junto con el valor de temperatura obtenido en el punto 4 deben ser empleados en el cálculo de la dosis de riego en superficie.

Punto 4: punto sobre la superficie del material de relleno para la determinación de los valores de temperatura, humedad y concentración de sustancias inhibidoras para el cálculo de la dosis de riego y la efectividad del biofiltro en la eliminación de sustancias causantes de malos olores.



Fotografía nº 45: Ubicación del punto 4. Similar al punto de toma actual.

6. Modificaciones en la estructura.

Uno de los puntos en los que deberían realizarse modificaciones estructurales es en el acceso al biofiltro. El acceso para el llenado y vaciado del biofiltro con el material de relleno se ha facilitado mediante la instalación de varias traviesas apiladas que son retiradas cuando se realizan las labores de llenado y vaciado. Estas traviesas presentan varios inconvenientes. Aunque tratadas, las traviesas sufren deterioro y su vida útil es limitada con lo que se encarece el mantenimiento del biofiltro.

Más importancia tiene el hecho de que no aíslan correctamente el lugar del biofiltro donde están colocadas, provocando la aparición de caminos preferenciales para el aire tratado y la aparición de lixiviados por su base. Estos lixiviados no son recogidos debidamente y por tanto no son tratados como residuo. Lo recomendable sería la sustitución de las traviesas por paneles.



Fotografía nº 46: Traviesas instaladas en el biofiltro de tamices. Señaladas en la fotografía aparecen los posibles caminos preferenciales para el aire tratado y la aparición de lixiviados en la parte inferior tras cada riego.

La cubierta metálica construida en el biofiltro debería ser eliminada. El material empleado para su construcción no soporta la corrosión lo que supone un cierto riesgo para el personal de la planta ante posibles desprendimientos y condensaciones que tienen lugar en su superficie. Además, su retirada facilitaría el llenado y vaciado del biofiltro desde el exterior del mismo.



Fotografía n° 47: Estado de las vigas que sustentan la cubierta metálica del biofiltro.

Otra de las modificaciones que debieran ser acometidas en el biofiltro, es la separación de los distintos tipos de lixiviados procedentes de la cámara de humectación y el propio biofiltro. Actualmente ambos lixiviados desembocan en una misma arqueta y de ahí son conducidos a la cabecera de la depuradora donde son tratados. La separación de estos dos lixiviados presentaría varias ventajas:

- Permitiría la recirculación del agua empleada en la cámara.
- Facilitaría el análisis del lixiviado procedente de la cámara de humidificación, lo que permitiría conocer su composición y por tanto la efectividad de la cámara en la eliminación de las sustancias inhibidoras.

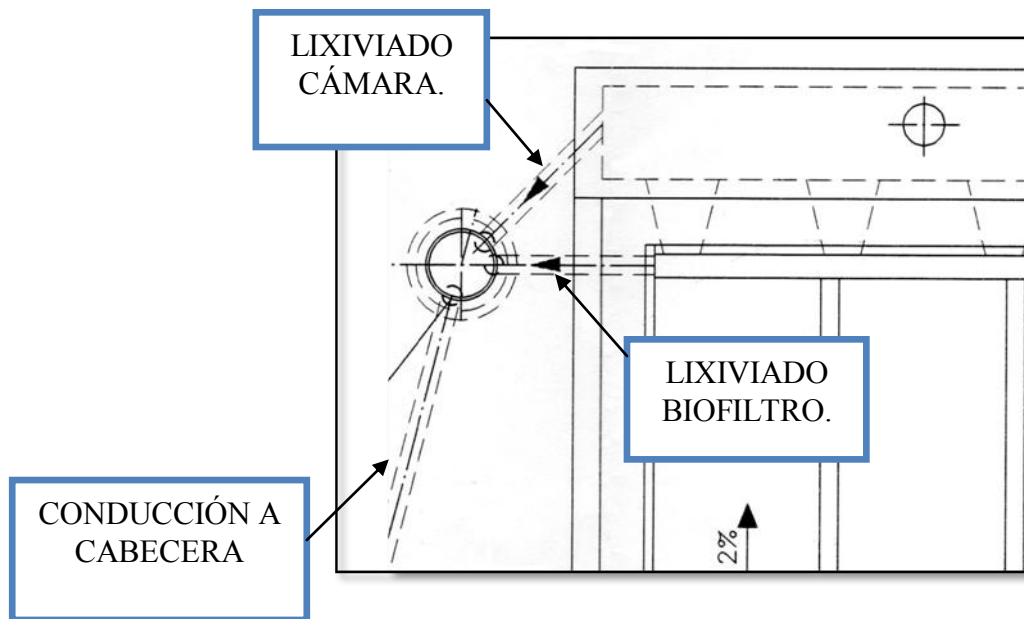


Figura nº15: Representación de las conducciones de lixiviados del biofiltro hasta la arqueta.

Modificaciones en el manejo del biofiltro:

1. **Puesta en marcha de la cámara de humidificación.** Se conseguiría la saturación del gas a tratar facilitando el desarrollo de la biopelícula alrededor del material de relleno, la absorción de los contaminantes hacia la fase líquida y la degradación de éstos por parte de los microorganismos.

Se reduciría la cantidad de compuestos acidificantes en la corriente de aire y por tanto, el funcionamiento del biofiltro tendría mayor efectividad.

2. **Aumento de la altura del material filtrante.**

Por el tipo de biofiltro construido (estructura de hormigón), la variación en la superficie ocupada por el material de relleno sería difícil y costosa, además de acarrear una parada prolongada en el funcionamiento del biofiltro. La modificación más factible para la corrección necesaria en el tiempo de residencia de la corriente de aire en el material de relleno sería el aumento de la altura del material de relleno.

Este cambio es asumible ya que la altura actual (1,25 metros), está por debajo de la altura teórica a la que pueden llegar los materiales filtrantes de tipo orgánico, (1,50 metros). Además, se ha de tener en cuenta que por el tipo de material

utilizado este aumento podría ser incluso mayor. El material filtrante ha sufrido un proceso de compostaje por lo que presenta gran estabilidad. (Saña, 2.010).

Mediante el aumento de la altura del material filtrante se conseguiría un aumento del volumen total del biofiltro, lo que a su vez, incrementaría el tiempo de residencia del gas en el medio filtrante. La estructura de hormigón del biofiltro de tamices soportaría una altura del material filtrante de 1,50 metros de altura. Mediante esta corrección se obtendría un nuevo valor para el tiempo de residencia del gas en el interior del material de relleno. Este nuevo valor sería:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{84}{6822} = 0.01h \times 3600 \frac{seg}{h} = 44 \text{ seg.}$$

Teniendo en cuenta que el intervalo de referencia para el tiempo de residencia real es de (30 – 60) segundos, el nuevo valor que se obtendría sería mucho más adecuado.

3. Aumento de la granulometría y mejor cribado y limpieza del material de relleno.



Fotografía nº48: Vista del perfil del biofiltro donde pueden observarse gran cantidad de materiales plásticos. A la derecha, ejemplo de partículas de tamaño muy superior al cribado realizado.

Aunque el material de relleno empleado, (material de rechazo), ha soportado de manera correcta los procesos de degradación sufridos, sería recomendable el aumento de su granulometría.

De la misma manera sería recomendable el realizar un mejor cribado del material, ya que, el material de relleno utilizado durante el ensayo poseía partículas de dimensiones muy superiores a las especificadas, así como plásticos e incluso metales. De ésta forma se provoca la aparición de caminos preferenciales.

4. Instalación de una única capa de material filtrante. El llenado del biofiltro con dos granulometrías distintas de material filtrante, colocando una capa inferior de granulometría mayor era una práctica habitual que también ha sido realizada en el biofiltro de tamices. Sin embargo, esta práctica se ha demostrado innecesaria cuando el material de relleno es material que ha sufrido un proceso de compostaje previo.

Por tanto, para el biofiltro de tamices es indiferente la colocación de dos capas distintas de material filtrante, presentando mayores ventajas la colocación de una única capa del mismo material.

- Alta disponibilidad de material de rechazo frente a la disponibilidad que presenta la madera de chopo que ha de ser adquirida a un proveedor ajeno a la planta depuradora, lo que puede generar problemas de disponibilidad de dicho material.
- Debido al motivo anterior, el llenado del biofiltro se encarece de manera innecesaria.
- A la hora de realizar la sustitución del material de relleno, el material sustituido ha de ser procesado de igual manera sin hacerse necesarios dos procesos de tratamiento. Uno para el cribado y otro para la madera de chopo.

5. Control de los parámetros de funcionamiento. Una vez llenado el biofiltro con nuevo material filtrante, ha de determinarse un programa de seguimiento de los parámetros de funcionamiento realizando variaciones en el funcionamiento hasta alcanzar los valores óptimos de dichos parámetros. Un posible seguimiento de parámetros podría ser el siguiente:

- Controles diarios: temperatura y humedad de la corriente de aire previamente a la entrada en el material de relleno, tras el paso por la cámara de humidificación.
- Controles semanales: comprobación del correcto funcionamiento del sistema de riego, realización de mediciones de presencia de sustancias malolientes e inhibidoras de la actividad del biofiltro. Control y registro de la presión de la corriente tras el paso por el ventilador para el control de la pérdida de carga.
- Controles trimestrales: análisis del material filtrante y lixiviado del biofiltro para determinar niveles de pH, conductividad eléctrica, contenido en humedad...
- Controles anuales: cálculo de la eficiencia de eliminación de olores del biofiltro realizando mediciones de presencia de olores según normativa “*Olfatometría dinámica UNE – EN 13.725*”. (ANEXO 6).

Los valores en los que han de situarse todos los parámetros controlados se presentan en la siguiente tabla resumen:

Tabla nº 15: Tabla resumen con los valores de los parámetros de funcionamiento de biofiltros.
(Pagans, 2.007, Saña 2.010).

PARÁMETRO	CONDICIONES OPTIMAS	ZONA INTERMEDIA	CONDICIONES NEGATIVAS
CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE AIRE NO TRATADO			
Temperatura (°C)	20-37	10 – 20 °C y 37-40	< 10°C y > 40
Humedad relativa (%)	> 99	95 – 99	< 95
Concentración partículas (mg/Nm ³)	< 1	1 – 10	> 10
CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN			
Carga volumétrica aire (m ³ /m ² ·h)	100 - 150	50 - 100 o 150 -200	< 50 o > 200
Tiempo de residencia (s)	30 - 60	15 - 30 o 60 - 120	< 15 o > 120
Pérdida de carga (Pa)	< 500	500 - 1000	> 1000
CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO DE RELLENO			
Conductividad eléctrica (µS/cm)	< 1 000	1 000< CE <3000	> 3000
g NH ₄ ⁺ -NO _x ⁻ -N/kg medio húmedo	0,25 – 3,5	3,5 - 5 y 0,15 – 0,25	> 5 o < 0,15
Contenido en materia seca (%)	25< MS<40	20< MS < 25 y 40< MS < 50	> 50 o < 20
pH	6< pH < 8	5< pH <6 y 8< pH <9	pH < 5 o pH > 9

- 6. Aporte de humedad inicial:** previamente a la puesta en circulación de la corriente de aire a través del material de relleno se ha de aportar humedad al medio filtrante para que éste alcance los niveles de humedad requeridos. Este nivel de humedad deberá ser mantenido mediante la saturación del gas en la cámara de humidificación y el aporte de riegos en superficie.

Para el cálculo de la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad inicial se emplea la siguiente ecuación: (*modificado de Etcharen, 2.005*).

$$A_{inicial} = V_f \times \rho_{AP} \times \% H$$

Donde,

V_f : volumen de medio filtrante (m^3).

$A_{inicial}$: humedad inicial.

ρ : densidad del material de relleno. (Kg/m^3)

$H \%$: Porcentaje de humedad recomendada. (%). Entre un 40 – 60 %.

- 7. Cálculo de nueva frecuencia de riego.** Al entrar en funcionamiento la cámara humidificadora, el aporte de humedad al material filtrante del biofiltro se realizará mediante la humidificación de la corriente a tratar. Sin embargo, el sistema de riego debe permanecer en funcionamiento con dos objetivos:

- Complementar el aporte de humedad necesario para el correcto desarrollo de las reacciones de degradación de los contaminantes. Se hará necesario el control de la humedad del material hasta que se alcance un contenido mínimo de humedad del 40 %.
- Realizar un lavado periódico del perfil del material filtrante arrastrando hacia el lixiviado del biofiltro los metabolitos que pudieran aparecer durante la degradación de sustancias olorosas.

Es previsible que la frecuencia y caudal de riego necesario para alcanzar los niveles mínimos de humedad y que éstos se mantengan sea mayor de la que actualmente se empleaba. (ANEXO N° 4).

8. Cálculo del número de renovaciones.

Tras la realización de las modificaciones propuestas, (sobre todo el mejor aislamiento del edificio de tamices), se deberían realizar mediciones de presencia de sustancias tóxicas en el aire ambiente del edificio para complementar las mediciones obtenidas en los puntos propuestos.

Estas mediciones tendrían como objetivo el ajuste del número de renovaciones a realizar. De tal forma que en las horas de trabajo las concentraciones de sustancias tóxicas no alcancen niveles peligrosos para la plantilla. Pudiendo efectuarse un número menor de renovaciones en las horas nocturnas con el consiguiente ahorro energético. En el capítulo de anexos se incluye una tabla con los efectos generados por el ácido sulfhídrico y los valores máximos permitidos. (ANEXO 5).

9. Eliminación periódica de malas hierbas de la superficie del biofiltro. Como ha sido comentado en el capítulo de antecedentes del trabajo, la presencia de hongos como microorganismos degradantes de las sustancias olorosas, es perjudicial debido al micelio que desarrollan y que provoca la aparición de caminos preferenciales y taponamiento de poros del material filtrante. Por la misma razón, la presencia de vegetación en la superficie del biofiltro perjudica el correcto funcionamiento de los biofiltros suponiendo la aparición de caminos preferenciales y el aumento de la pérdida de carga por las raíces de la vegetación. (Saña, 2.010).

Una práctica habitual en la superficie de biofiltros compuestos por materiales filtrantes de tipo orgánico es la eliminación de dicha vegetación. En el biofiltro de tamices la presencia de vegetación en su superficie era importante, con lo que sería recomendable su eliminación. Por otro lado, la presencia de vegetación es indicadora de la presencia de amoníaco en la corriente de aire tratada, lo que da información acerca del incorrecto funcionamiento del biofiltro. (Saña, 2.010).



Fotografía nº 49: Vista de una porción de la superficie del biofiltro de tamices con una amplia presencia de vegetación.

6.- CONCLUSIONES.

1. El sistema de eliminación de olores por biofiltración es un sistema adecuado para el caso del edificio de tamices y para la eliminación de olores de la futura nave de compostaje de la Depuradora de Arazuri. En ambos casos se trata de caudales altos y continuos con concentraciones de contaminantes relativamente bajas.
2. El material de relleno empleado en el ensayo realizado y que será utilizado más tarde para el llenado de los biofiltros de la nave de compostaje es correcto. Presenta una buena capacidad tampón, ha sufrido un proceso de compostaje previamente lo que le confiere una gran estabilidad y resistencia a la degradación. Posee una alta disponibilidad y su adquisición no tiene coste para la Planta Depuradora de Arazuri.
3. Durante la puesta en marcha del biofiltro de tamices no se han alcanzado los niveles de humedad y temperatura en el material de relleno necesarios para el desarrollo de la actividad microbiana en su máximo nivel. La actividad del biofiltro ha sido mucho menor de la que podría haber llegado a ser de haberse alcanzado estos niveles.
4. El funcionamiento del biofiltro ha expuesto, tanto a la estructura que forma el biofiltro como al material de relleno, a una emisión gaseosa con concentraciones de sulfhídrico y amoníaco que aunque bajas han sido continuadas. Lo cual ha provocado la conversión del sulfhídrico en ácido sulfúrico y en dióxido de azufre. El primero ha degenerado la estructura. Por su parte, el dióxido de azufre inhibe la actividad microbiana y disminuye la cantidad de microorganismos presentes en el material de relleno.
5. Los niveles de pH determinados tanto para el lixiviado del biofiltro ($\text{pH} < 2$), como para el material de relleno, ($7 < \text{pH} < 8$), así como la estimación teórica de sustancias eliminadas en el lixiviado, indican que el funcionamiento del biofiltro de tamices de la Estación depuradora de Arazuri llevado a cabo, se ha asemejado más al de una torre de lavado que a un sistema de biofiltración. Se introduce gas en el material de

relleno cuyas partículas contaminantes son arrastradas hacia el lixiviado del biofiltro mediante el sistema de riego y no degradadas por parte de los microorganismos contenidos en el biofiltro.

6. Ni a la hora de la redacción del proyecto de ejecución del biofiltro de tamices, ni cuando éste se llenó para su puesta en marcha, se realizó una caracterización del gas que iba a ser tratado en él. De haberse realizado, éste hecho hubiese condicionado en gran medida el tipo de biofiltro construido y su manejo posterior.
7. La inversión en medidas correctoras de emisión de corrientes olorosas debe ir acompañada de la realización de un estudio previo de los puntos de emisión y la adopción de medidas que aislen y minimicen estas emisiones. No es el caso de la corriente de aire tratada en el biofiltro de tamices, donde tras la construcción del biofiltro, durante el proceso llevado a cabo en el edificio de tamices éste no permanecía en ningún momento cerrado con lo que la corriente que debía ser tratada era emitida directamente a la atmósfera.
8. Para el correcto funcionamiento del biofiltro ha de ponerse en marcha la cámara de humidificación y comprobar si mediante la humectación del gas las concentraciones de amoníaco y sulfídrico se reducen. Se debe complementar este aporte de humedad mediante el riego en superficie, para lo cual será necesario un nuevo cálculo de la frecuencia de riego.
9. Se ha de elaborar un nuevo manual de toma de datos durante el funcionamiento del biofiltro corrigiendo el actual. Para lo cual han de decidirse los puntos de toma de datos e introducirse las modificaciones que lo permitan. La información aportada por estos datos permitirá ajustar el funcionamiento del biofiltro y alcanzar la efectividad potencial de este sistema de eliminación de olores.

Los puntos de control para los parámetros de funcionamiento del biofiltro que deben sustituir a los actuales, se presentan en el apartado 5.4 de este trabajo: *“Propuesta de modificaciones en el funcionamiento del biofiltro.”*

BIBLIOGRAFÍA:

- Almarcha Morell M., Nadal Lorenzo S., *"Biofiltración avanzada en la depuración de emisiones odoríferas"*. Infoenviro; octubre 2005; pp 47-52.
- Batlle Joher J., García Castillo M.C., Flor García M.V., Ortiz Alemany F., *"Control de olores en una EDAR mediante adicción de sales férricas a la línea de fangos primarios"*. Tecnología del agua; 153; junio 1996; pp 40-45.
- Bieger K., *"Eliminación de olores. Descripción y comparación de los procesos aplicados."* Tecnología del agua; 193; octubre 1999; pp 109-121.
- Cárdenas González B., Revah Moiseev S., Hernández Jiménez S., Martínez Sánchez A., Gutiérrez Avedoy V., INE-Semarnat, *"Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas"*. Instituto Nacional de Ecología de México, 2003.
- Cid J, Mocholí F., *"Afectación socioambiental por olores del compostaje en túneles de lodos de EDAR"*. Tecnología del agua; 294; marzo 2008; pp 75-79.
- Coll Lozano C., Mantilla Iglesias E., García González R., *"Evaluación del proceso de desodorización en una EDAR. Utilización del H₂S como indicador del olor"*. Ingeniería química; abril 2006; pp 103-110.
- Devinny J., Deshusses M., Webster T., *"Biofiltration for air pollution control"*. Editado por CRC Press, 1999.
- Echtner E., Bieger K., *"Biofiltros de desodorización: sistemas fiables para afrontar las nuevas exigencias en olores"*. Tecnología del agua; 225; junio 2002; pp 60-65.

- Etcharen Ulloa P., “*Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de olores en la fábrica Lubascher y Krause*”. Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Temuco, Tesis doctoral, Temuco, 2005.
- Fernández Sé S. “*Evaluación de los costes de construcción y operación de un biofiltro*”. Proyecto final de carrera. Ingeniería Técnica Industrial. Universidad Autónoma de Barcelona, 2007.
- Gabriel D., Deshusses M., “*Retrofitting existing chemical scrubbers to biotrickling filters for H₂S emission control*”. PNAS; 100 n°. 11; Mayo 2003.
- La Pagans E., Harreveld A., “*Gestión de instalaciones de biofiltración para el tratamiento de aire del proceso de compostaje de fangos*”. Odournet, 2007.
- Martínez Ataz E., Díaz de Mera Morales Y., “*Contaminación atmosférica*”. Ediciones de la Universidad de Castilla La Mancha, 2004.
- Moreno Casco J., Moral Herrero R., “*Compostaje*”. Editorial Mundi - prensa, 2008.
- Muro J., Irigoien N. “*Apuntes de Fitotecnia 3º Ingenieros Agrónomos, U.P.N.A.*”
- Puigvert X., Narcís C., Eduard M., “*Emisiones de gases y olores de las explotaciones de engorde de porcino*”. www.3tres3.com; Marzo 2010.
- Saña J., “*Jornada sobre tratamiento del aire en instalaciones de compostaje*”. Mancomunidad de la Comarca de Pamplona. Junio 2010.
- Seoáñez Calvo, M. “*Tratado de la contaminación atmosférica*”. Editorial Mundi - prensa, 2002.

- Shareefdeen Z., Singh A., *"Biotechnology for odor and pollution control"*. Editorial Springer, 2005.
- Silvia de la Calle, P. *"Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de estireno en una corriente gaseosa procedente de la industria química"*. Proyecto final de carrera, Ingeniería Química, Universidad de Cádiz, 2010.
- *"The BioCycle guide to odor management at composting facilities"*. Editado por Biocycle. 2006.
- United States Environmental Protection Agency. *"Folleto informativo del manejo de biosólidos y residuos. Control de olores en el manejo de biosólidos."* Septiembre 2000.
- Vinot M., *"El problema de los olores en el tratamiento de los RSU, una experiencia práctica"*. Urbaser. Noviembre 2009.

PÁGINAS WEBS:

- DELTA-T DEVICES LTD.
www.delta-t.co.uk
- DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y VIVIENDA DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA.
mediambient.gencat.cat
- DRÄGER SAFETY HISPANIA, S.A.
www.draeger.es
- HANNA INSTRUMENTS S.L.
www.hannainst.es
- INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO.
www.insht.es

- INSTRUMENTOS TESTO S.A.
www.testo.es
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA DE MÉXICO.
www.ine.gob.mx
- MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA.
www.mcp.es
- PÁGINA DEL CERDO.
www.3tres3.com
- ODOURNET S.L.
www.odournet.com
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD.
www.who.int/es/
- PORTAL DE METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA DE NAVARRA.
meteo.navarra.es
- SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES, S.A
www.sta-at.com
- WEIDNER IBÉRICA S.L.
www.weidneriberica.com

7.- ANEXOS.

1. VISTA AÉREA DE LA E.D.A.R. DE ARAZURI. Ubicación del biofiltro de tamices dentro de la planta depuradora.
2. ESQUEMA GENERAL BIOFILTRO DE TAMICES. Vista aérea de la instalación en la que se indican cada uno de los elementos que la forman.
3. ESQUEMA GENERAL DEL TRATAMIENTO REALIZADO EN LA E.D.A.R. DE ARAZURI. Proceso que comprende el tratamiento de agua residual de la Comarca de Pamplona y el tratamiento de los biosólidos generados en dicho tratamiento.
4. MÉTODO DE CÁLCULO DE DOSIS DE RIEGO EN SUPERFICIE PARA EL BIOFILTRO. Método propuesto para un biofiltro con material de relleno de tipo orgánico.
5. TABLA DE EFECTOS GENERADOS POR LA PRESENCIA DE H₂S A DISTINTAS CONCENTRACIONES.
6. NORMATIVA: “*Olfatometría dinámica UNE – EN 13.725*”.

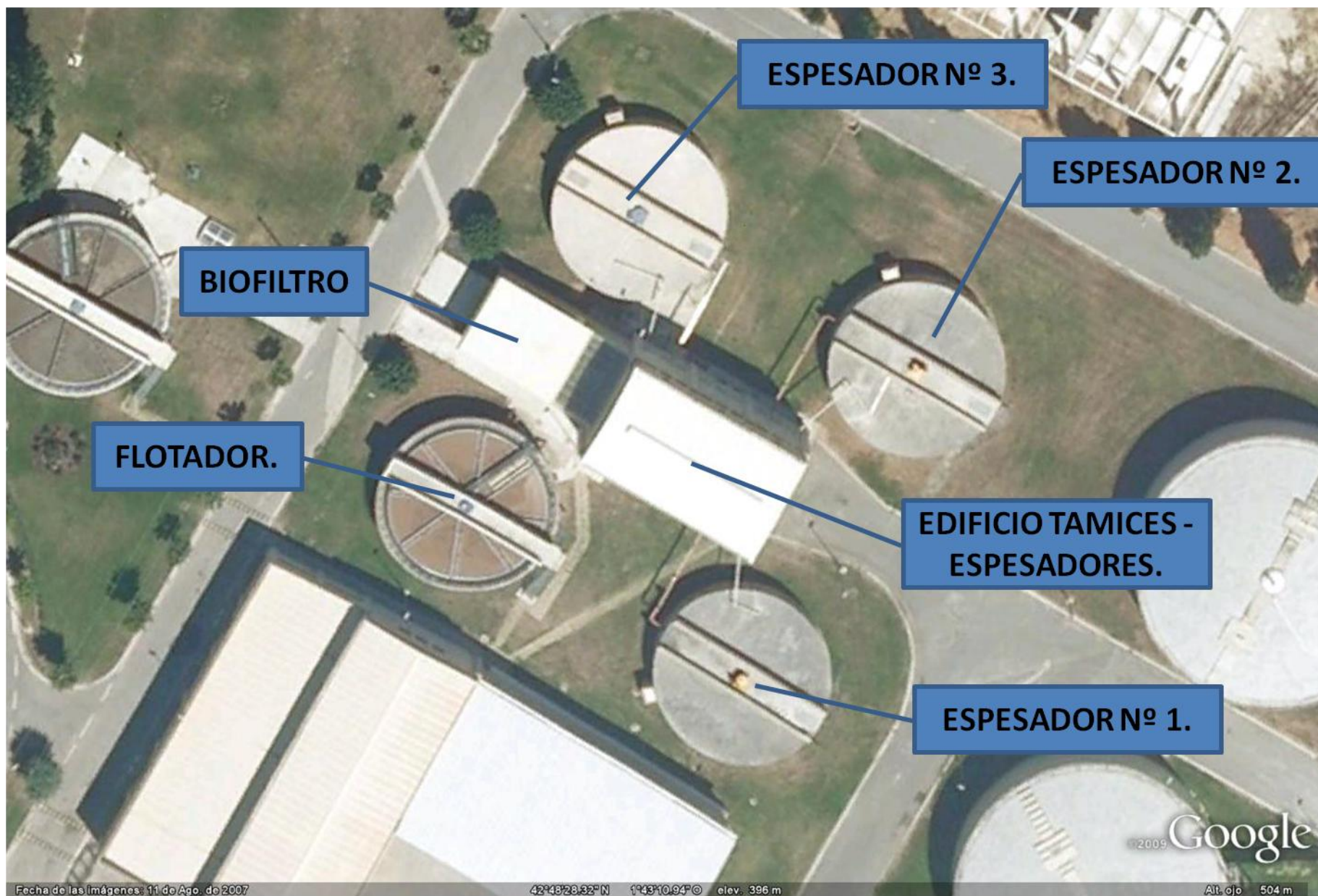
ANEXO 1.

VISTA AÉREA DE LA E.D.A.R. DE ARAZURI.



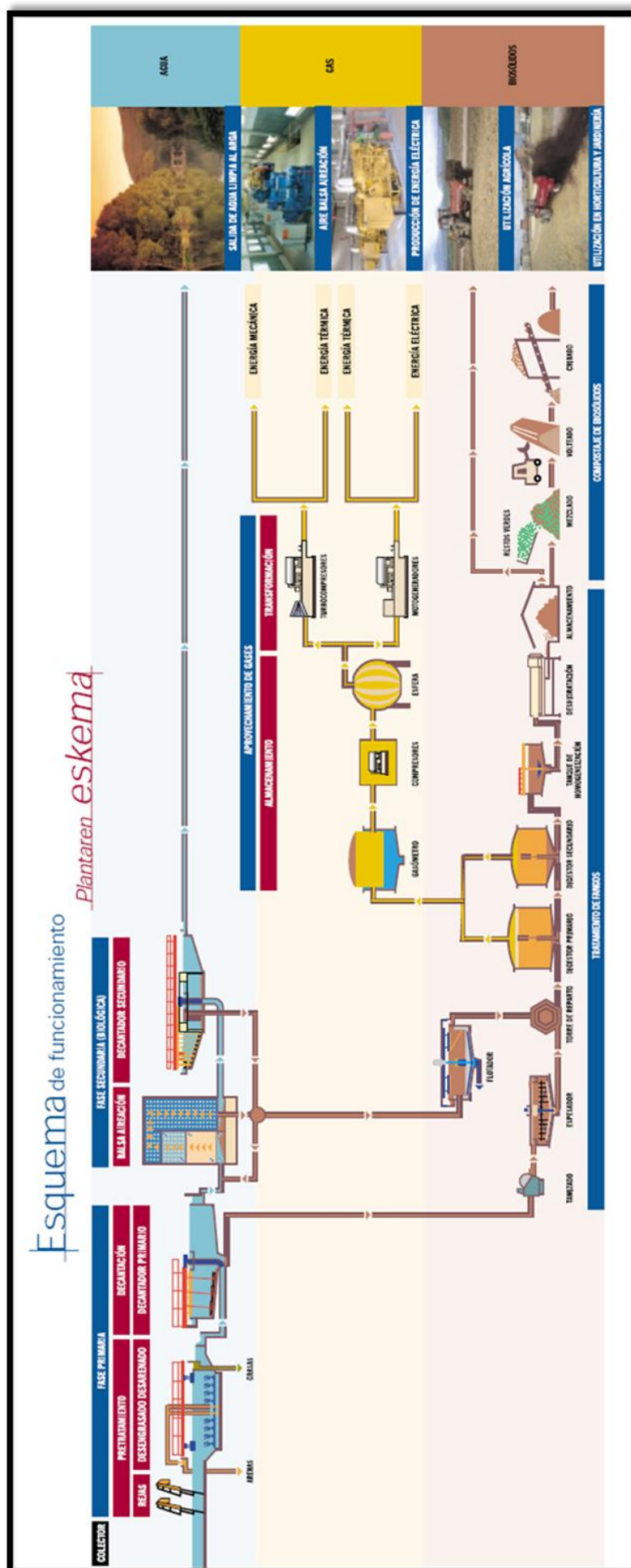
ANEXO 2.

ESQUEMA GENERAL BIOFILTRO DE TAMICES.



ANEXO 3.

ESQUEMA GENERAL DEL TRATAMIENTO REALIZADO EN LA E.D.A.R. DE ARAZURI.



ANEXO 4.

MÉTODO DE CÁLCULO DE DOSIS DE RIEGO PARA EL BIOFILTRO.

Modificado de Etcharen, 2005.

En primer lugar, ha de calcularse la densidad del aire tanto a la entrada como a la salida del biofiltro. El cálculo se realiza de forma aproximada asumiendo gases ideales.

$$\rho_{Aire} = \frac{P}{R \times T} \times PM$$

Donde:

ρ : densidad del aire (Kg/m³)

P : presión (atm), se considera $P = 1$ atm.

R : constante de gas ideal 0,082 (atm l/g mol °K)

T : temperatura (° K)

$P.M.$: peso molecular del aire (29 g/g mol)

A continuación, ha de suponerse que la corriente de aire que es introducida al biofiltro es aire seco para la obtención del flujo másico de aire que es introducido en el sistema.

$$F_M = \rho_{aire} \times Q$$

Donde:

F_M : flujo másico de aire seco (kg aire seco /h).

ρ : densidad del aire obtenida en la ecuación anterior. (Kg/m³).

Q : caudal de aire seco a tratar (m³/h).

Considerando las densidades calculadas para la corriente de entrada y salida se obtienen los flujos másicos de ambas corrientes.

Para las condiciones de entrada, (t^a entrada, HR = 100 %), y salida del aire, (t^a salida, HR = 100 %), al biofiltro se obtienen la humedad relativa del aire (kg agua/ kg aire seco) empleando el diagrama psicrométrico.

El flujo de agua que necesario para mantener la humedad del material de relleno dentro de los niveles señalados como adecuados, se calcula mediante un balance de masas:

$$Flujo\ necesario = Flujo\ agua_{salida} - Flujo\ agua_{entrada}$$

El valor de flujo obtenido ha de multiplicarse por un factor de corrección debido a las posibles pérdidas de agua o fallos en el sistema de riego. Lo recomendable es su aporte al material mediante varios riegos diarios.

ANEXO 5.

TABLAS DE EFECTOS GENERADOS POR LA PRESENCIA DE H₂S A DISTINTAS CONCENTRACIONES.

Concentración en aire	Efectos
0,14 - 0,28 mg/m ³ (0,1 - 0,2 ppm)	Umbral odorífico.
4,2 - 7 mg/m ³ (4,2 - 7 ppm)	Olor molesto.
14 mg/m ³ (10 ppm)	TLV.
70 - 140 mg/m ³ (50 - 100 ppm)	Umbral lesión grave ocular.
210 - 350 mg/m ³ (150 - 250 ppm)	Parálisis olfativa.
420 mg/m ³ (300 ppm)	IPVS.
420 - 700 mg/m ³ (300 - 500 ppm)	Edema pulmonar.
700 - 1400 mg/m ³ (500 - 1000 ppm)	Apnea y estimulación intensa del sistema nervioso central.
1400 - 2800 mg/m ³ (1000 - 2000 ppm)	Colapso inmediato con parálisis respiratoria.

Fuente: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (<http://www.insht.es/>).

Nivel de H ₂ S (ppmv)	Efectos sobre el hombre.
0,005	Límite de detección de olor mínimo
0,3 a 1	Perceptible por la mayoría de las personas por el olor y por el gusto
3 a 5	Fácilmente detectable, intensidad de olor moderada
0,7 a 7	Comienza la irritación de ojos.
10	Nivel de exposición permisible para 8 hrs. (día de trabajo).
10 a 20	Irritación de ojos inmediata
20 a 30	Olor fuerte desagradable, pero no intolerable. A esta concentración se produce tos e irritación de ojos, concentración máxima permisible para períodos cortos (20 ppmv por 10 min)
50	Irritación de ojos pronunciada y garganta, Es posibles estar expuesto durante varios minutos.
100	Tos fuerte, irritación de ojos, pérdida del sentido del olfato después de 2 a tres minutos, pueden picar los ojos y garganta.
200	Inflamación de ojos y del tracto respiratorio después de 1 hora de exposición.
500 a 700	Pérdida de consciencia y posible muerte en 30 minutos a 1 hora de exposición. Se requerirá aplicar resurrección artificial
700 a 1000	Pérdida de consciencia rápida, cese o paro de la respiración y muerte, podrá resultar en un permanente daño cerebral. Se debe realizar resucitación y administrar oxígeno
1000 a 2000	Pérdida inmediata de la consciencia, daño cerebral inminente y posterior muerte del individuo

Fuente: Etcharen , 2005.

ANEXO 6.

NORMATIVA: “Olfatometría dinámica UNE – EN 13.725”